



ZAŠTITA PRIOBALNOG MORA  
OD IZNENADNOG IZLJEVA  
ULJA S BRODOVA

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
INSTITUT RUĐER BOŠKOVIĆ, ZAGREB

Interdisciplinarni doktorski studij  
Zaštita prirode i okoliša

Marko Jugo, mag. ing. naut.

ZAŠTITA PRIOBALNOG MORA OD IZNENADNOG IZLJEVA ULJA S  
BRODOVA

Doktorski rad

OSIJEK, 2024.

## **TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA**

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Doktorski rad

Institut Ruđer Bošković

Interdisciplinarni doktorski studij *Zaštita prirode i okoliša*

Znanstveno područje: *Prirodne znanosti*

Znanstveno polje: *Biologija i Kemija*

### **ZAŠTITA PRIOBALNOG MORA OD IZNENADNOG IZLJEVA ULJA S BRODOVA**

Marko Jugo, mag. ing. naut.

**Doktorski rad izrađen je u:** Institutu Ruđer Bošković, Zavod za istraživanje mora i okoliša, Laboratorij za informatiku i modeliranje okoliša.

**Mentor, komentor: dr. sc. Tin Klanjšček**, voditelj laboratorija za informatiku i modeliranje okoliša, znanstveni savjetnik Instituta Ruđer Bošković u Zagrebu; **izv. prof. dr. sc. Maja Dutour Sikirić**, izvanredna profesorica Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku znanstvena savjetnica Instituta Ruđer Bošković u Zagrebu.

#### **Kratki sadržaj dokorskog rada:**

Akcident izljeva ulja s brodova može značajno utjecati na kakvoću mora i priobalne ekosustave. Kako bi se spriječile značajne posljedice, potrebno je sanirati zahvaćeno područje čim je prije moguće. Prikupljanje ulja specijaliziranim brodovima jedna je od najučinkovitijih mjera sanacije. Pri tome je lokacija ključni parametar koji određuje hoće li brod stići na vrijeme kako bi se spriječilo nekontrolirano širenje ulja i utjecaj na ekosustav mora. Analiza prijašnjih intervencija pokazuje kako je u gotovo svakoj sudjelovalo previše brodova, čime se drastično povećavaju troškovi i rizik po ekosustave. Razlog za to je što često za vrijeme intervencije nastane novi akcident na koji brodovi zbog zauzeća ne mogu pravovremeno reagirati. Disertacijom će se značajno unaprijediti intervencije nalaženjem optimalnog broja brodova za pojedinu lokaciju i veličinu izljeva, uzimajući u obzir sve moguće kombinacije brodova raspoređenih u različitim lukama. Time će se maksimalno smanjiti utjecaj izljeva ulja na ekosustav mora i njegovu funkciju.

**Broj stranica: 78**

**Broj slika: 31**

**Broj tablica: 6**

**Broj literaturnih navoda: 74**

**Jezik izvornika: hrvatski**

**Ključne riječi:** ekosustavi, hijerarhijska optimizacija, specijalizirani brodovi, starenje ulja

**Datum obrane:**

**Stručno povjerenstvo za obranu:**

**Doktorski rad je pohranjen u:** Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici Zagreb, Ul. Hrvatske bratske zajednice 4, Zagreb; Gradskoj i sveučilišnoj knjižnici Osijek, Europska avenija 24, Osijek; Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Trg sv. Trojstva 3, Osijek.

## **BASIC DOCUMENTATION CARD**

---

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek**

**Ph.D. thesis**

**Ruder Bošković Institute**

**Postgraduate Interdisciplinary University Doctoral Study:** *Environmental Protection and Nature Conservation*

**Scientific Area:** *Natural Science*

**Scientific Field:** *Biology, and Chemistry*

### **Coastal Sea Protection from Accidental Oil Spill from Ships**

**Marko Jugo, mag. ing. naut.**

**Thesis performed at:** Ruder Bošković Institute, department for Marine and Environmental Research, Laboratory for Informatics and Environmental Modeling.

**Supervisors:** **Ph.D. Tin Klanjšček**, head of the laboratory for informatics and environmental modeling, scientific advisor at the Ruder Bošković Institute in Zagreb; **Ph.D. Maja Dutour Sikirić**, associate professor at Josip Juraj Strossmayer University in Osijek scientific advisor at the Ruder Bošković Institute in Zagreb.

#### **Summary:**

Oil spills from ships can significantly affect the quality of the sea and coastal ecosystems. To avoid lasting negative consequences, the affected area must be remediated as soon as possible. The oil collection by specialized vessels is one of the most effective response measures. The location of the spill relative to the ship is a crucial determinant of whether the vessel will arrive in time to contain the oil spill. Analysis of previous responses to oil spills regularly shows inadequate mobilization of ships. Apart from drastically increasing the costs, over-mobilization also increases risks to ecosystems because mobilized remediation vessels cannot respond to new threats frequently occurring during remediation. The dissertation will significantly improve the remediation by determining the optimal number of ships for a given location and size of the oil spill, considering all possible combinations of vessels deployed in different ports. Therefore, results will significantly reduce the impact of oil spills on the affected marine ecosystem.

**Number of pages:** 78

**Number of figures:** 31

**Number of tables:** 6

**Number of references:** 74

**Original in:** Croatian

**Keywords:** Ecosystems, Fate of Oil Spills, Hierarchical Optimization, and Specialized ships.

**Date of the thesis defense:**

#### **Reviewers:**

**The thesis was deposited in the** National and University Library in Zagreb, Ul. Hrvatske bratske zajednice 4, Zagreb; City and University Library of Osijek, Europska avenija 24, Osijek; Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Trg sv. Trojstva 3, Osijek.



**Tema doktorskog rada:** prihvaćena je na sjednici Sveučilišnog vijeća za poslijediplomske interdisciplinarne sveučilišne doktorske studije dana: 21. 3. 2024.

Ocjena rada  
u tijeku

*Doktorat posvećujem svom omiljenom suigraču: Nancy Mrkić Jugo, najveće  
hvala! Bez tvoje neumorne podrške i osmijeha ne bi bilo ni ove disertacije!*

Ocjena rada  
u tisku

## *Zahvala:*

Prije svega, želim istaknuti da je ulogu znanstvenog savjetnika prilikom pisanja ove radnje imao prof. dr sc. Tarzan Legović. Dragi profesore puno hvala na nesebičnoj pomoći, savjetima, brojnim uputama i razgovorima, e-mailovima, ohrabrenjima, a iznad svega prijateljstvu! Zbog svega navedenog, značajan dio svog znanstvenog odgoja dugujem upravo Vama.

Veliko hvala mojim mentorima dr. sc. Tinu Klanjščeku, z. sav. i prof. dr.sc. Maji Dutour Sikirić. Hvala mentoru Klanjščeku na iscrpnim e-mailovima koji su znali stizati i u 4 ujutro s odgovorima, ispravicima i dopunama te brojnim razgovorima i nadasve prijateljskim savjetima! Hvala na cizeliranju rukopisa (stavkama koja izazivaju granule znoja na čelu) i preciziranju terminologije. Hvala Vam što ste se uhvatili u koštac s mojim idejama te iz kolopleta istih, dali smjernice za one najbolje.

Mentorice Dutour Sikirić zahvaljujem Vam na video pozivima, korisnim i stručnim savjetima, nesebičnoj pomoći, odvajanju vremena prilikom čitanja rukopisa uz pomne sugestije koje su značajno unaprijedile kvalitetu istog.

Također bih se želio zahvaliti pok. prof. dr. sc. Goranu Kniewaldu na podršci i vjetru u leđa kada mi je bilo najpotrebnije! Zahvalan sam na prekrasnim predavanjima vezanim za oceanografiju i sedimentaciju. Nadalje, zahvalan sam prof. dr.sc. Enrihu Merdiću, na uputama, povratnim informacijama, literaturnim jedinicama i zanimljivim predavanjima iz ekologije.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Branimiru Hackenbergeru Kutuzoviću, prof. dr. sc. Elviri Kovač-Andrić i dr. sc. Sunčani Geček, v. z. sur. Veliko hvala na uloženom trudu i ukazivanju na nove smjernice u rukopisu.

Hvala prijatelju prof. dr. sc. Ivanu Dražiću, na potpori, razumijevanju i učinkovitim savjetima prilikom pisanja disertacije. Hvala i Teu Grubišiću na raznolikim razgovorima i savjetima vezanim za ekologiju i biologiju mora.

Na koncu, želim se zahvaliti svojoj obitelji, posebice roditeljima, na svesrdnoj pomoći i ohrabrenju koje ste mi dali tijekom cijelog akademskog školovanja. Neizmjereno vam hvala!

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	3
2.1. Nesreća broda Torrey Canyon.....	4
2.2. Nesreća broda Amoco Cadiz.....	5
2.3. Nesreća broda Exxon Valdez .....	7
2.4. Nesreća broda Prestige .....	9
2.5. Tankerske nesreće danas .....	11
2.6. Opasnosti kod sudara tankera.....	14
2.7. Specijalizirana oprema za uklanjanje onečišćenja .....	17
2.8. Uporaba zaštitnih brana.....	20
2.9. Specijalizirana plovila za sprječavanje onečišćenja mora.....	23
2.10. Troškovi sanacije.....	26
2.11. Prethodno razvijeni modeli .....	28
2.12. Procjena kretanja uljne mrlje u priobalnom moru.....	29
2.12.1. Širenje uljne mrlje .....	30
2.12.2. Gibanje uljne mrlje na površini mora .....	31
3. MATERIJALI I METODE .....	35
3.1. Hijerarhijski model optimizacije .....	42
3.1.1. Općeniti hijerarhijski (dinamički) algoritam za kombinatorni problem.....	43
4. REZULTATI.....	46
4.1. Analitičko eksperimentalni dio pomoću ADIOS® programa.....	56
4.2. Simulacija onečišćenja mora .....	62
5. RASPRAVA .....	67
6. ZAKLJUČAK .....	70
7. LITERATURA .....	71
ŽIVOTOPIS.....	78



## 1. UVOD

Postoje razne vrste onečišćenja mora, a većina se može pratiti slijedeći unošenje materijala ili energije u okoliš. Materijali se kreću od jednostavnih do složenih kemikalija i sitnih čestica (Jusup i sur. 2022).

Pomorski promet jedan je od najbitnijih načina prijevoza robe i tereta te najveća onečišćenja nastaju upravo na morskim ekosustavima. Promet morem potiče globalizaciju s više od 80 % raznih tereta koji se prevoze (Fratila i sur. 2021). Slijedom navedenog, održivost pomorskog prometa je od vitalnog značaja. Transport ulja (pod uljem podrazumijevamo opći pojam koji se upotrebljava za označavanje velikog broja prirodnih tvari biljnog, životinjskog ili mineralnog porijekla, kao i čitav niz sintetskih spojeva), predstavlja rizik i mogućnost značajnog onečišćenja mora i priobalja. Jedna od većih nesreća onečišćenja mora bila je uzrokovana potonućem broda Torrey Canyon (1967), gdje se iz tankova izlilo ulje, čime je onečišćeno preko 300 km engleske i francuske obale. Između ostalog, posljedica je bila uginuće preko 15 000 morskih ptica (Ye i sur. 2021). Pomorske nesreće poput broda Exxon Valdez (1989), rezultirale su usvajanjem međunarodnog dogovora da se na brodove za prijevoz tekućeg tereta (tankera) ugradi dvostruka oplata. Preventivna mjera ima za cilj utjecati na smanjenje ispuštanja ulja u slučaju pomorskih nesreća brodova za prijevoz tekućih tereta. Iako se tom mjerom smanjila vjerojatnost ispuštanja ulja u more s novih brodova, ona i dalje postoji naročito prilikom sudara dva broda ili udara broda u obalu koji uvijek nedvojbeno rezultira ispuštanjem i onečišćenjem mora uljima. Dodatno, sve vrste brodova u lukama moraju ukrcati bunker (pogonsko gorivo – postojano ulje visokog viskoziteta) gdje nerijetko dođe do izljeva ulja u more zbog mehaničkih ili operativnih razloga. Slijedom navedenoga, problem ispuštanja i sanacije ulja iz mora je i dalje aktualan te će zasigurno tako ostati u budućnosti. U slučajevima onečišćenja uljem potrebno je najbrže moguće i pravilno reagirati kako bi se održao nesmetan transport te zaštitili ekosustavi mora.

U akvatorijima gdje postoji prelov ribe i pokušava se uspostaviti održivi ribolov (Legović i sur. 2010, Geček i sur. 2012), onečišćenjem takvog područja s uljem može dodatno dovesti do ugroze faune. Također, onečišćenje uljem može dovesti i do kraha marikulture. Marikultura svakodnevno sve više postaje važno područje proizvodnje hrane u svijetu. Visoki profiti privukli su ulagače u posljednja dva desetljeća potaknuvši razvoj marikulture (Jusup i sur. 2007). Onečišćenjem takvog akvatorija, može dovesti do pada razvitka marikulture te odbiti

potencijalne ulagače. Navedeno može imati značajne posljedice za razvitak gospodarstva države.

Posebno su ugrožena zaštićena područja poput nacionalnih parkova i značajnih krajobraza. Upravo zaštićena područja imaju ključnu ulogu u zdravlju ekosustava. Navedena područja su često podvrgnuta ljudskoj aktivnosti, odnosno, rekreaciji (Klanjšček i sur. 2018). Postaje pravni okvir koji propisuje način rekreacije na takvim područjima u vidu prevencije od onečišćenja mora s uljima. No, u navedenim akvatorijima nerijetko dolazi do onečišćenja s neperzistentnim uljima iz manjih brodica. U takvim scenarijima, najčešće intervencija nije potrebna već nadzor nad akvatorijem gdje je ulje izliveno.

Manjkavosti do sada razvijenih modela za sanaciju onečišćenja mora s uljima su ne uključivanje specijaliziranih brodova u modele i oslanjanje isključivo na samostalne skimmere, zatim ne uzimanje u obzir vrijeme aktivnosti prikupljanja ulja, karakteristike ulja i opreme i sukladno s time minimizacije perioda sanacije onečišćenja. Novi modeli sanacije koji će biti predstavljeni u disertaciji omogućuju najmanji posljedični utjecaj na ekosustav mora (moguću hipoksiju u priobalnom moru, najmanje uginuće organizama, najmanje otapanje ulja u morski stupac te najmanje prekrivanje uljem međuplinskih zajednica).

Iz navedenoga se vidi potreba za razvojem i unaprjeđenjem metoda sanacije izlijeva ulja na površinu mora prije svega zbog očuvanja ekosustava mora i priobalja.

Cilj istraživanja je formulirati i predložiti nove modele koji optimiziraju broj specijaliziranih brodova i minimiziraju vrijeme skupljanja ulja s površine u slučaju akcidenta te time minimiziraju negativne utjecaje prometa i akcidenta na bioraznolikost priobalnog mora. Također će se razmotriti najvažniji procesi koji dovode do značajnog utjecaja na funkcioniranje i bioraznolikost ekosustava mora, između ostalog pojavu hipoksije te povećanje koncentracije spojeva ulja u vodenom stupcu.

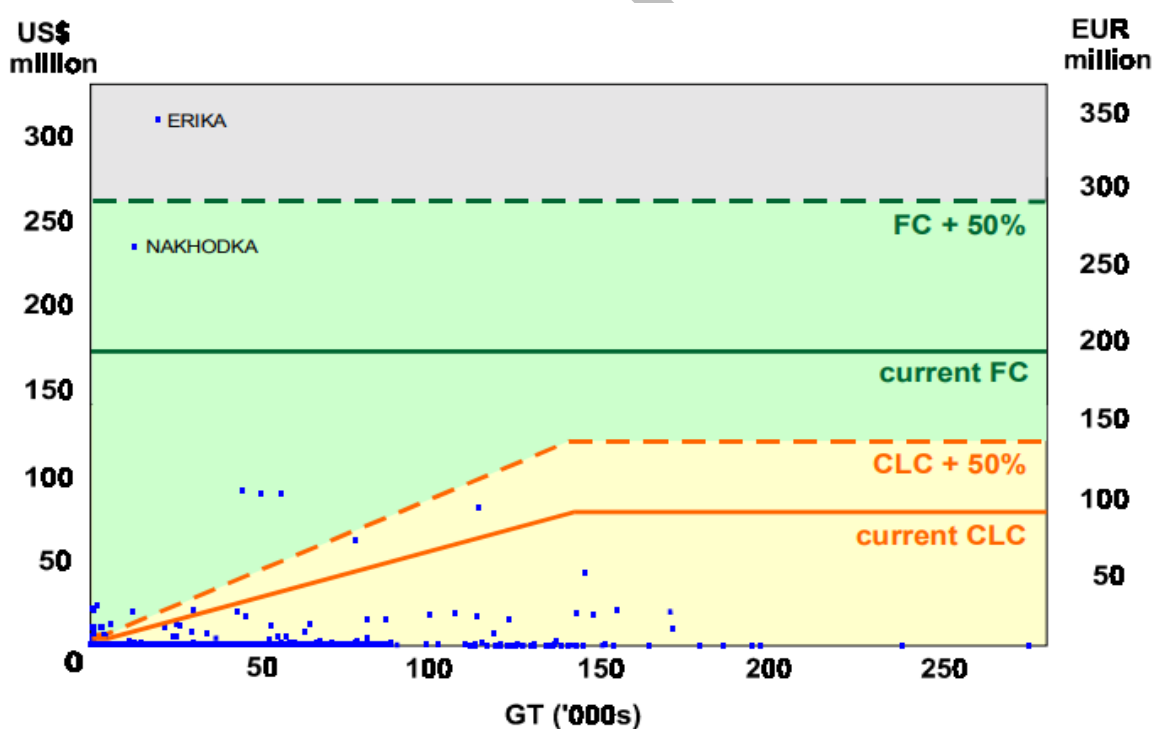
Hipoteze koje će se istražiti su:

① Za zadani broj brodova unaprijed određenih karakteristika i njihove udaljenosti od onečišćenja postoji optimalan broj brodova i redoslijed njihova slanja koji minimizira vrijeme skupljanja onečišćenja i širenje onečišćenja po morskoj površini.

② Minimizacija troška prikupljanja uz uvjet minimizacije onečišćenje obale može dati alternativne optimizacije broja poslanih brodova i njihovog redoslijeda od onog koji minimizira vrijeme prikupljanja.

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Danas su pomorske nezgode manje učestalije nego zadnjih dvadesetak godina. Sukladno tome, velikih izljeva u more na godišnjoj razini svaki put je sve manje u usporedbi s prethodnim godinama. Razlog tome je tehnološki napredak u izgradnji i rukovanju brodova. No to ne znači da pomorskih nezgoda nema i da su one potpuno nestale. Iako su se pomorske nezgode koje rezultiraju velikim onečišćenjem smanjile, iste su još uvijek prisutne.. Danas najčešća onečišćenja događaju se u lukama gdje plovila onečišćuju more s brodskim pogonskim gorivom, odnosno bunkerom. Oko 40 % nezgoda događa se u lukama, a 28 % u priobalnom području.



Slika 1. Troškovi izljeva ulja s tankera Erika i Nakhodka (ITOPF, 2024).

- ⇒ Oznaka FC, Fund Convention.
- ⇒ Oznaka CLC, Civil Liability Convention.

Slika 1. prikazuje visinu troškova koji su nastali kao posljedica izlijevanja ulja na morsku površinu s broda Erika i broda Nakhodka. Vidljivo je da su troškovi izraženi u milijunima američkih dolara odnosno eura. Veće količine ulja znatno utječu na okoliš te nastaju ogromni troškovi čišćenja i sanacije ulja sa zahvaćenog dijela mora i/ili obala. U nastavku rada bit će

prikazane četiri najznačajnije nezgode na moru koje su rezultirale velikim onečišćenjem i napravile veliku štetu za morski okoliš i životinjski svijet. Također, pojedine tankerske nezgode napravile su prekretnicu i dovele su do novih sigurnosnih mjera kako bi prijevoz bio što sigurniji.

Nadalje, bit će analizirane i prikazane tankerske nesreće koje susrećemo danas i način ophođenja operativnog osoblja kod prikupljanja ulja s morske površine.

## **2.1. Nesreća broda Torrey Canyon**

Torrey Canyon je bio tanker za prijevoz tekućeg tereta koji je bio registriran pod liberijskom zastavom. Brod koji je 1967. godine plovio iz Perzijskog zaljeva nasukao se zbog ljudske pogreške prilikom manevriranja te ispustio u more 119000 tona sirove nafte. Posljedica nasukavanja je bila ogromna. Onečišćeno je preko 300 kilometara engleske i francuske obale koje je zahtijevalo iznimne napore operativnog osoblja prilikom uklanjanja ulja s obale. Također prilikom uklanjanja ulja s obale javljale su se brojne opasnosti i nezgode. U razdoblju od dvadeset dana brod je izgubio sav teret, odnosno ulje koje se nalazilo na brodu u potpunosti je iscurilo u more. Poduzete mjere za uklanjanje ulja s morske površine nisu bile dovoljno učinkovite, te je vlada Ujedinjenog Kraljevstva naredila zračno bombardiranje samoga plovila. Poduzeta akcija je bila samo djelomično učinkovita i nije dala željene rezultate. Upotrijebljeno je i potrošeno preko 10.000 tona disperzanata koji su se posipali po morskoj površini s pomoću specijaliziranih brodova. Disperzanti razbijaju ulje u čestice i tako olakšavaju prikupljanje ulja s morske površine. Disperzanti mogu imati štetan utjecaj na žive organizme u moru te su danas u pojedinim državama zabranjeni, a koriste se samo disperzanti treće generacije. Pod utjecajem meteoroloških čimbenika, kao što su vjetar i morske struje, naftna mrlja nastavila se je brzo širiti prema jugozapadu Engleske. Za Ujedinjeno Kraljevstvo je to predstavljalo veliki problem jer je direktno utjecalo na ljetnu turističku sezonu. Ulje koje se kretalo prema jugozapadu Engleske imalo je ozbiljnu posljedicu za životinjski svijet. Točnije, nasukanjem broda Torrey Canyon uginulo je preko tisuću morskih ptica (Bralić i sur. 2006) najviše zbog toga što se ulje zalijepilo na perje morskih ptica te su tako izgubile prirodnu izolaciju od hladnoće. Nadalje, od 8000 ptica koje su nakon nasukavanja odnesene s okolnih plaža kako bi im se pružila pomoć, samo 100-150 jedinki je Kraljevsko društvo za zaštitu ptica procijenilo dovoljno samostalnim za puštanje u prirodu. Na njih 60 je stavljen prsten, a kroz tridesetak dana već ih je 16 pronađeno uginulo (Boyle, 1969). Najveći broj uginulih ptica pronađenih u Engleskoj i Francuskoj odnosio se na đirke i žiletke (Buorne i sur. 1967).



Na lokalitetima gdje su korišteni deterdženti veliki dio životinjskog svijeta je uginuo, a ista je sudbina zadesila i zelene, crvene i smeđe alge. Neke od ugroženih vrsta bili su puževi, desetonošci i bodljikaši (Southward i Southward, 1987). Nepovoljan utjecaj deterdženta uočen je i kod populacija crva uz obale Hamblea i Warsasha gdje su korišteni deterdženti i gdje je došlo do velike smrtnosti odraslih jedinki *Cirriiformia tentaculata* i *Cirratulus cirratus*. U okolnim mjestima koja su također bila zahvaćena uljnim onečišćenjem, no gdje nisu korišteni deterdženti, primijećena je mala smrtnost spomenutih populacija (George, 1971). Nakon nepovoljnih posljedica korištenja deterdženata pri sanaciji onečišćenja, danas se oni više ne koriste te su u nekim državama i zabranjeni za korištenje.

Utjecaj ulja i deterdženta promatran je i u međuplinskim zajednicama na onečišćenim lokacijama. Na tretiranim lokacijama uz stjenovite obale došlo je do pomora riba i beskralješnjaka, a sama kombinacija ulja i deterdženta pokazala se štetnijom od djelovanja samog izlivenog ulja (Law, 2011).

Nezgodu Torrey Canyon se smatra jednom od prvih i najznačajnijih pomorskih nezgoda koja je imala velike posljedice na morski okoliš. Navedena nezgoda je dovela do zaključka da niti jedna država nije u stanju samostalno očistiti veće količine ulja. Ako uzmemo da su karakteristike razvijenih zemalja visoka kapitalna opremljenost i visok BDP-a zaključuje se da nezgoda poput Torrey Canyon može znatno oštetiti gospodarstvo jedne države (Babić i sur. 2016). Jedna od najznačajnijih usvojenih preventivnih mjera je ta da su oformljene i ujedinjene organizacije s ciljem brže intervencije na iznenadna onečišćenja mora.

## **2.2. Nesreća broda Amoco Cadiz**

Nadalje, pomorska nezgoda koja se dogodila 1978. godine na putu za Englesku bio je tanker Amoco Cadiz koji se nasukao na greben ispred obala Bretanje (Schlager i sur. 2000). Mehanički kvar na plovilu, točnije kvar na kormilarskom uređaju imao je za posljedicu da brod više nije bio pod kontrolom časnika na straži. Brod je plutao u jako teškom moru s izrazito visokim valovima prema luci Portsall. Zbog neupravljivosti, brod se nasukao. Posljedica nasukavanja bilo je probijanje oplata broda i tankova tereta. U razdoblju od dva tjedna iz broda je iscurilo 227.000 tona sirove nafte na morsku površinu te je onečišćeno preko 400 kilometara obale. Akcije čišćenja su dodatno otežavali vremenski uvjeti (Bralić i sur. 2006). Ulje u dodiru s morem ima kemijsku reakciju stvaranja čokoladne mrlje, odnosno emulzije. S emulzijom raste i volumen same tekućine na morskoj površini, što dodatno otežava prikupljanje ulja. Također je potrebno naglasiti da kod akcija čišćenja i prikupljanja ulja s

morske površine u privremene tankove na moru ili kopnu, treba pomno razmotriti njihov kapacitet. Nadalje, okolni otpad zajedno s emulzijom osjetno otežava sanaciju. Zbog emulzije i loših vremenskih uvjeta, intervencija čišćenja nije dala željene rezultate. Ulje je onečistilo područje od Bresta do Saint Brienca. Od posljedica uljnog onečišćenja veliki broj životinja u okolnom području je uginuo.

Najveća smrtnost zabilježena je u radijusu od pet kilometara od nezgode i na obalama gdje se nakupilo ulje (naselja Aber Wrac'h, Trebeurden i Roscoff). U prvom tjednu zabilježena je velika smrtnost organizama u plimnim i međuplimnim zonama. U plimnim zonama stjenovite obale zabilježena je smrtnost od 54 % za vrste *Littorina*, *Gibbula* i *Monodonta*, a pomor vrste *Patella* iznosio je otprilike 30 % u odnosu na razdoblje prije nezgode. Vrijedi napomenuti kako u podplimnim zonama stjenovitih obala nije bilo većih utjecaja onečišćenja na spužve i morske zvijezde. Što se pak pješćanih i muljevitih obala tiče, zabilježen je veći mortalitet i teže posljedice pa su tako primjerice u međuplimnoj zoni teško pogođene populacije školjkaša vrsta *Solenidae*, *Macridae* i *Veneridae*. Smrtnost je zabilježena i kod crva vrsta *Nereis diversicolor*, *Arenicola marina* i *Audouinia tentaculata* koji su inače otporniji od drugih organizama na uljno onečišćenje. U podplimnim zonama je pak zabilježeno gotovo nestajanje rakova *Aapseudes* i *Ampelisca* (Conan i sur. 1982).

Također, nakon nasukavanja znatno je smanjena populacija rakova na području zaljeva Morlaix i Lannion. Trebalo je desetak godina da dođe do približne rekolonizacije populacija uz varijacije po lokalitetima. Ipak, određeni amfipodi u razdoblju od deset godina nisu postigli repopulaciju kako bi se vratili na brojnost prije nezgode. Primjer za to su vrste *A. armoricana* i *A. sarsi* koje zbog slabog kretanja i sporog razmnožavanja nisu povratili brojnost u zaljevu Morlaix kao prije nezgode (Dauvin i Gentil, 1990).

Izljev ulja ugrozio je gospodarski važno područje poznato po uzgoju kamenica. Posebne štete nastale su na lokalitetima Abers i zaljev Morlaix, a vrijedi naglasiti kako nije došlo do velikog pomora kamenica, već do kontaminacije od koje je onečišćeno otprilike  $150 \times 10^3$  kg europske kamenice (*Ostrea edulis*) i  $6 \times 10^6$  kg pacifičke kamenice (*Crassostrea gigas*). Istraživanje provedeno sedam godina nakon nesreće pokazalo je da su kamenice i dalje bile izložene aromatskim ugljikovodicima (Berthou i sur. 1987).

Također je zabilježen veliki pomor među pticama, a u 1978. godini zabilježeno je bar 4572 uginulih jedinki i zahvaćeno preko 33 vrsta ptica. Među njima, najviše su zahvaćene nJORKE od kojih 1391 tupika *Fratercula arctica*, plosnatokljunih njorki *Alca torda* i 731 guillemota *Uria aalge* (Jones i sur. 1978). Kasnije je procijenjeni broj stradalih ptica iznosio između 15000 i 20000 (Conan i sur. 1982).



Slika 2. Potonuće broda Amoco Cadiz  
(Preuzeto s: Wikipedia - Amoco\_Cadiz\_oil\_spill 2024).

### 2.3. Nesreća broda Exxon Valdez

Na putu za Long Beach brod Exxon Valdez se nasukao na greben blizu Aljaske godine 1989. Nezgoda se dogodila zbog pogreške zapovjednika broda koji je u to vrijeme na zapovjedničkom mostu držao stražu pod utjecajem alkohola. Treći oficir koji je također bio na mostu nije pravovremeno reagirao. Značajno je dodati da je razlog pomorskih nezgoda čak 75 % ljudski faktor (Grech i sur. 2002). Osam od jedanaest tankova broda je oštećeno i iz njih je iscurilo 38.000 tona sirove nafte. Ulje je onečistilo preko 1300 kilometara obale što je ugrozilo ribarstvo i marikulturu. Alati za ribarenje koje je ulje onečistilo za ribare je predstavljalo nove financijske izdatke. Troškovi su bili toliko veliki da se i danas ribarima nadoknađuju troškovi jer su onemogućeni živjeti od ribolova. Većina sisavaca koji su obitavali u tom području je zahvaćeno i bili su prebačeni u posebne rezervate. Kod intervencija operativnog osoblja na iznenadna onečišćenja mora u slučajevima kada je riječ o većim izljevima (kao što je Exxon Valdez) treba voditi posebnu pažnju i odlučiti o prioritetima koje dijelove treba prvo zaštititi. Na pomorskim kartama su određena područja posebno naznačena kao akvatoriji od velikog gospodarskog značenja i njih je potrebno prvo zaštititi od onečišćenja uljem (IMO, 2005). Operativno osoblje je koristilo uređaje s visokim tlakom kako bi odstranili ulje s morske obale, ali zbog visokih para i temperature dodatno su stradali mikroorganizmi. Najznačajnija promjena poslije nezgode Exxona Valdeza je ta što su se počeli primjenjivati propisi za gradnju

brodova s dvostrukom oplatom. Tako se znatno povećala sigurnost plovidbe te je smanjen udio curenja ulja na morsku površinu nakon sudara ili nasukavanja broda.

Izljev ulja imao je neposredan utjecaj na pomor životinja u okolnom području, a neki od razloga za to su direktan kontakt morskih sisavaca i ptica s morskom površinom na kojoj su plutale velike količine izlivenog ulja. Nadalje, umašćivanje perja i krzna kod životinja dovodi do smanjenje izolacije i potencijalne hipotermije, gušenja i utapanja. Broj morskih vidri koje su uginule iznosi između 1000 i 2800, dok je oko 302 tuljana uginulo zbog udisanja štetnih para (Peterson i sur. 2005).

Osim posljedica direktnog štetnog dodira s uljem, nepovoljan ishod imalo je i čišćenje plaža s pomoću uređaja s visokim tlakom uzduž zaljeva Prince William Sound, što je rezultiralo nestankom brojnih populacija, među ostalim i staništima dagnji (*Mytilus trossulus*). Pretpostavka je bila da će se njihova staništa, koja su zbog prehrane i staništa važna za obnovu drugih međuplimnih populacija, povratiti u prijašnju gustoću i brojnost kroz nekoliko godina. Ipak, prirodni proces gubitka ugljikovodika ispod staništa dagnji bio je sporiji od očekivanog, a onečišćene dagnje postale su ugroza za životinjske organizme koji se njima hrane, kao i za ljude. Iako je primijećeno smanjenje koncentracije ugljikovodika kroz godine, posljedice nasukavanja i prisutnosti značajne kontaminacije na određenim lokalitetima očekuju se i nakon nekoliko desetljeća (Carls i sur. 2001).

Veliki broj vrsta koji žive u sedimentu zaljeva Prince William Sound se u razdoblju od jedanaest godina oporavio od nasukavanja i povećao u brojnosti i to na mjestima koja su bila onečišćena i tretirana visokim pritiskom. Ipak, nisu se sve zajednice povratile na stanje prije izljeva pa je tako primijećen školjkaš *P. staminea* prisutan u manjem broju nego što je bio prije nasukavanja (Fukuyama i sur. 2014). Ugroženi su i nacionalni parkovi izvan Prince William Sound zaljeva (Katmai i Kenai Fjords) gdje je ulje pronađeno i nakon više od dva desetljeća nakon nasukavanja (Lindeberg i sur. 2017).

Osim utjecaja na manje organizme i međuplimne zajednice, ostaci izlivenog ulja nepovoljno su utjecali na predatore zaljeva. Naime, kitovi ubojice koji su nakon izljeva ulja bili izloženi ulju na površini mora koje im je došlo u kontakt s kožom, bili su podložni i trovanju hranjenjem manjih organizama koji su također bili zahvaćeni kontaminacijom. Ako su onečišćenjem pogođene jedinke ženki kitova ubojica, repopulacija može trajati i po nekoliko desetljeća, a s obzirom na to da se radi o predatorima u slučaju velike kontaminacije može doći i do izumiranja. Primjer smanjenja broja kitova kroz godine nakon izlivanja nafte primijećena je kod skupine kitova koji su 1984. godine brojali 22 jedinke. Nekoliko mjeseci nakon nasukavanja koji se zbio 1989. godine 9 od 22 jedinki je nestalo te su se smatrale uginulim. Do



2005. godine u skupini je ostalo svega 7 do 8 jedinki te ugrozom i potencijalnim izumiranjem te skupine nestaje vrijedan član tog ekosustava, ali i vrijednost koju on ima za stanovništvo i turizam (Matkin i sur. 2008).

U razdoblju od pola godine nakon nezgode pronađeno je približno 30 000 nauljenih ptica, među ostalim gnjurci, kormorani i golubovi čirke. Pretpostavlja se da je od posljedica onečišćenja uginulo preko 250 000 ptica, a velik broj ih je uginuo od posljedica hranjenja organizmima koji su pogođeni izljevom (Irons i sur. 2000). Jedna od visoko pogođenih vrsta bila je i harlekinska patka (*Histrionicus histrionicus*) čija se populacija nije oporavila ni devet godina nakon nezgode. Razlog za to je neprekinuta izloženost izlivenom ulju u području na kojem harlekinske patke obitavaju. Na nepovoljnu repopulaciju patki ima utjecaj i njihova prehrana s bentoskim beskralješnjacima koji u sebi mogu zadržavati ugljikovodike (Esler i sur. 2002).



Slika 3. Širenje ulja po morskoj površini  
(preuzeto iz Hakaimagazine – Exxon Valdez oil spill, 2024).

#### 2.4. Nesreća broda Prestige

Nadalje, brod Prestige 19. studenog 2002. godine u jutarnjim satima puca na dva dijela oko 170 nautičkih milja zapadno od Viga. Obadvije sekcije broda su potonule na dubinu od 3500 m. Problem kod intervencije, osim ulja, predstavljao je i potonuća konstrukcije na veliku morsku dubinu. Osim razlivenog ulja, ostatci su nošeni morskom strujom što je dodatno kontaminiralo cijeli akvatorij i ugrozilo biljni i životinjski svijet. No, pomorska se nezgoda dogodila zimi pa je utjecaj na floru i faunu bio znatno manji.

Nakon završenih akcija čišćenja zahvaćenog područja, Europski parlament je osnovao privremenu zajednicu pod nazivom Mare Committee čiji je zadatak bio detaljno istražiti pomorsku nezgodu broda Prestige kako bi se otkrili uzroci nezgode. Uočivši nedostatke kod upravljanja brodom, zajednica je iznijela prijedloge za unaprjeđenije pomorskog prijevoza.

Utjecaj onečišćenja nakon nezgode analiziran je i uz stjenovitu obalu francuskog naselja Guétharyja. Proučavajući bentos uočeno je da je 2002. godine (uzimajući u obzir uzorkovanje prije nezgode) na tom području imalo stanište 57 vrsti dok je 2004. godine (odnosno nakon izljeva ulja) izbrojano svega 41 vrsti. Nekim vrstama bilo je potrebno dvije do tri godine kako bi se ponovno pojavile na prijašnjem staništu (*Amphipholis squamata*, *Calliostoma zizyphinum*, *Echinus esculentu*). Bilo je potrebno otprilike tri godine kako bi se brojnost vrsta vratila na sličan broj kao prije onečišćenja (58 vrsta u bentosu 2005. godine), a pet godina kako bi se struktura makrofaune povratila u slično stanje kao prije nezgode (Castège i sur. 2013).

Na plažama koje su najviše onečišćene nakon nezgode nestalo je do 66,7 % vrsti, a među najviše pogođenim bili su pogođeni mnogočetinaši i kukci. Nadalje, primijećeno je da osim što je veliki broj amfipoda nestao sa svojih staništa, prisutnost najučestalijih amfipoda poput *Bathyporeia pelagica* i *Haustorius arenarius* zapažena je samo u niskom međuplimnom dijelu, dok je u višim razinama gdje je veći postotak ulja primijećen njihov izostanak (de la Huz i sur. 2005).



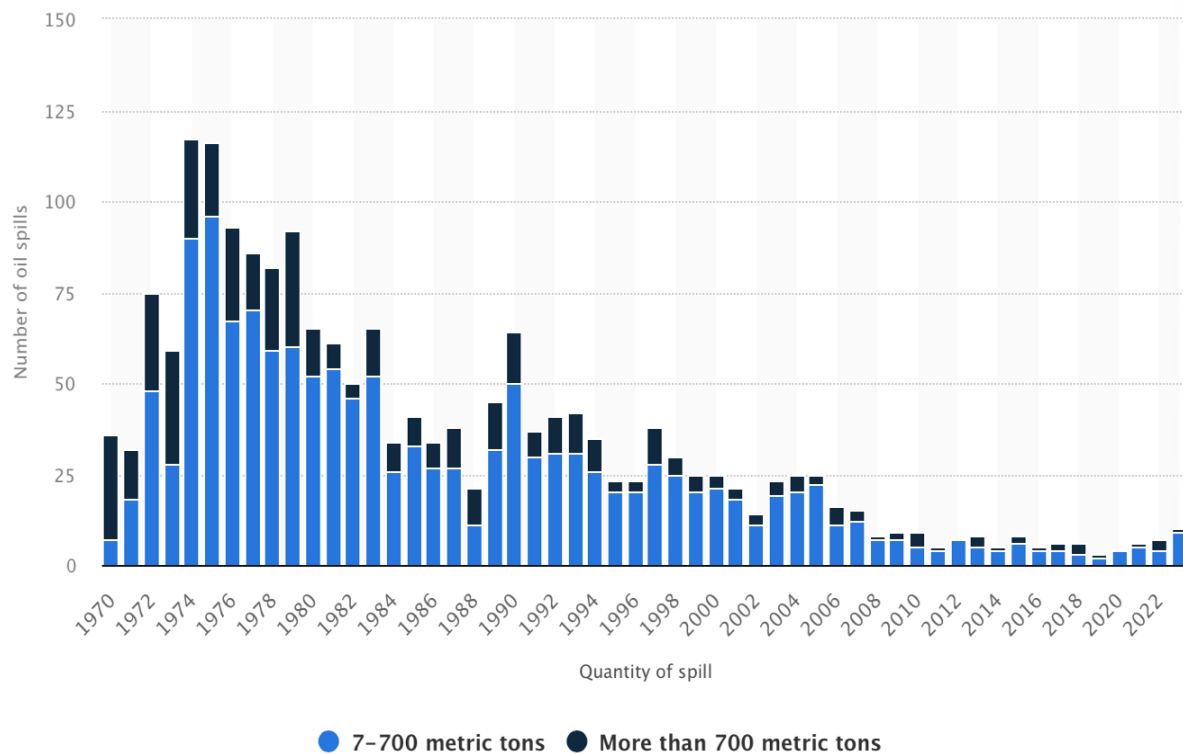
Slika 4. Potonuće broda Prestige  
(Safety4sea, 2023).

Iz navedenoga se može zaključiti kako su brodovi za prijevoz tekućeg tereta značajno više utjecali kao najveći onečišćivači u odnosu na druge vrste brodova. Sprječavanje onečišćenja s brodova, a naročito s tankera je vrlo važno za očuvanje prirode, okoliša te biološke raznolikosti. U sljedećem poglavlju istaknuti će se značajne tankerske nesreće koje su se dogodile tijekom zadnjih dvadesetak-tridesetak godina.

## **2.5. Tankerske nesreće danas**

Uzimajući u obzir izljeve ulja koji su veći od 700 tona, iz statističke analize podataka možemo uočiti da je trend sve manji i manji. Broj većih izljeva u more je zadnjih godina u padu i od 2010. godine prosječno izlijevanje ulja u more iznosi 1.9 tona na godinu. Vidljivo je da se 53 % većih izljeva ulja u more dogodilo tijekom 1970-ih godina (ITOPF, 2019). Potrebno je istaknuti kako pravni akti pomažu očuvanju okoliša i postizanju sljedećih ciljeva:

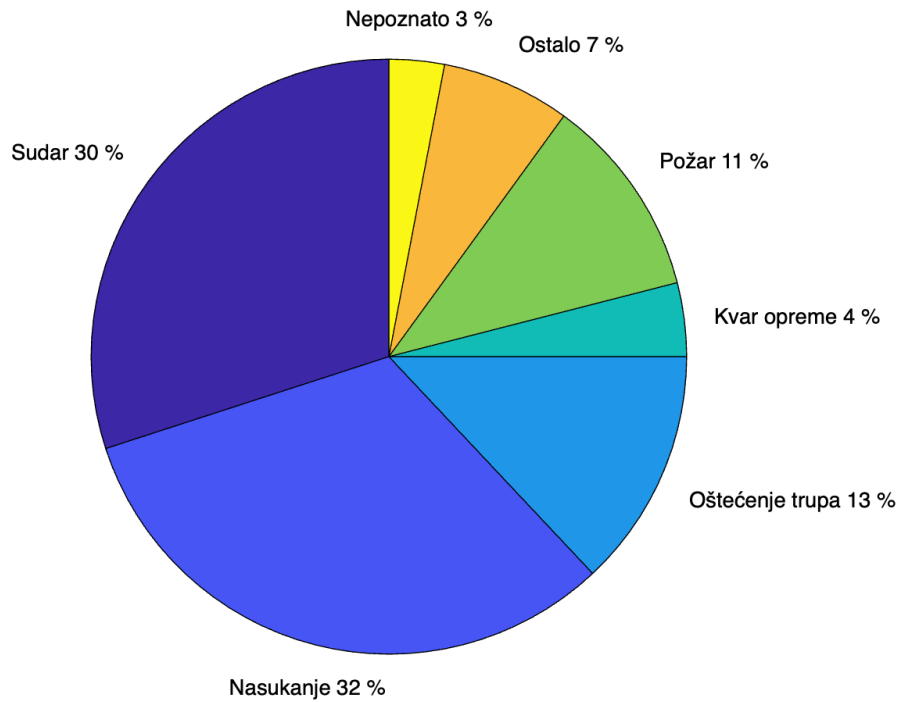
- očuvanju, zaštiti i poboljšanju kvalitete okoliša,
- zaštiti ljudskog zdravlja i racionalnim korištenjem prirodnih bogatstava,
- promicanju mjera na međunarodnoj razini kojima se rješavaju svjetski problemi okoliša (Kersan-Škabić i sur. 2015).



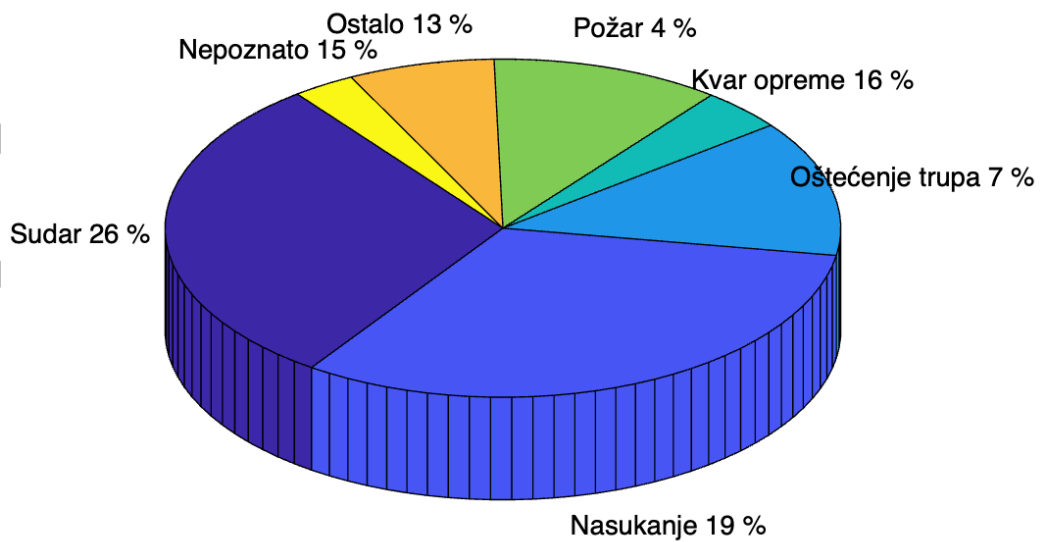
Slika 5. Prikaz tankerskih izljeva ulja u mora 1970. – 2023. (Statista, 2024).

Iako su tankerske nezgode u padu zbog primjene preventivnih mjera to ne znači da pomorskih nezgoda danas nema i da su sigurnosne mjere dovedene do savršenstva. Brod Bow Jubail u luci Rotterdam 2018. godine ispustio je 216 m<sup>3</sup> teškog goriva, odnosno bunkera. Zahvaćeno je i onečišćeno preko 50 brodova te onečišćen veliki broj morskih ptica. Potrebno je naglasiti da sve akcije i intervencije operativnog osoblja, zajedno sa specijaliziranom opremom, iziskuje velike financijske troškove čišćenja i vraćanje morske obale u prvobitno stanje. Najbolji primjer je upravo nezgoda s broda Bow Jubail gdje su se troškovi nezgode bili procijenjeni na 5 milijuna eura, dok su se na kraju sveukupni troškovi popeli na čak 80 milijuna eura. Iz svih pomorskih nezgoda važno je uočiti i analizirati pogreške koje su rezultirale onečišćenjem. Na taj način se usvoje lekcije koje se primjenjuju u budućnosti.





Slika 6. Uzrok tankerskih nesreća koje su rezultirale izljevom ulja > 700 tona (prilagođeno prema podacima ITOPF, za razdoblje: 1970. – 2023.)



Slika 7. Uzrok tankerskih nesreća koje su rezultirale izljevom ulja 7 – 700 tona (prilagođeno prema podacima ITOPF, za razdoblje: 1970. – 2023.)

Iz navedenih prikaza je vidljivo kako je najveći uzrok tankerskih nesreća u razdoblju od 1970. – 2023. godine, s volumenom izljeva do 700 izazvano sudarom, dok je za volumen izljeva preko 700 tona izazvano nasukanjem.

## 2.6. Opasnosti kod sudara tankera

Rizik, R; funkcija vjerojatnosti neželjenog događaja i posljedice koju će taj događaj izazvati.

$$R = f(p,C) \quad (1)$$

gdje p označava vjerojatnost pojave neželjenog događaja,  $p \in [0,1]$ , dok C podrazumijeva posljedicu izazvanu od strane nezgode,  $C \in [0,\infty)$ . Za međusobno isključive događaje, vjerojatnost da se bilo koji događaj dogodi zbroj je vjerojatnosti pojedinih događaja:

$$P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) \quad (1.1)$$

gdje su  $E_1$  i  $E_2$  dva nezavisna događaja (Fenton i sur. 2019). Nadalje, za bilo koja dva događaja, vjerojatnost da će se bilo koji događaj dogoditi je zbroj vjerojatnosti dva događaja umanjena za vjerojatnost oba događaja:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (1.2)$$

Vjerojatnost sudara između dva broda određena je i gustoćom prometa u određenom akvatoriju. Pod gustoćom prometa se podrazumijeva ukupan broj brodova po jedinici površine promatranog područja.

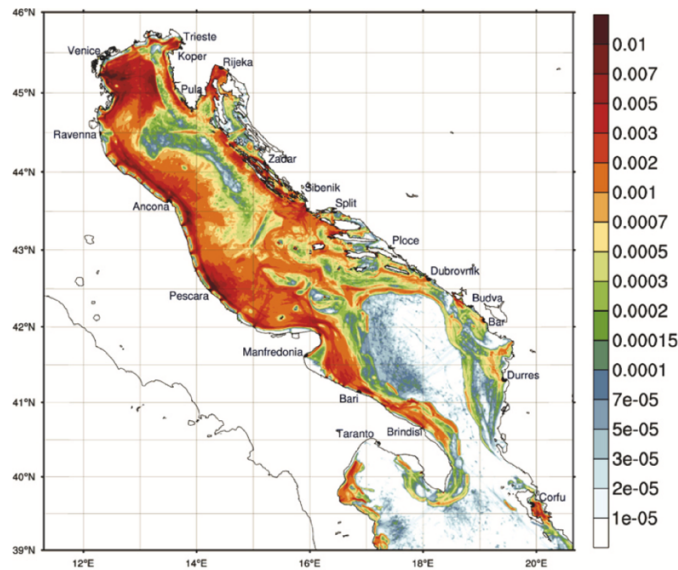
$$P_s = \frac{Nm_1 \cdot T}{(V_1 \cdot T) \cdot W} = \frac{Nm_1}{V_1 \cdot W} \quad (1.3)$$

gdje su: Ps: gustoća brodova (broj brodova/nm<sup>2</sup>), Nm1: učestalost dolaska brodova u određeni akvatorij, T: vrijeme izraženo u satima, W: prosječna širina plovnog kanala i V1: brzina brodova u čvorovima (Kristiansen i sur. 2005). Kod intervencije na izvanredna onečišćenja mora, osobito kod sudara, nasukavanja ili drugih šteta koje rezultiraju izlivanjem ulja u more, zapovjednik operativnog osoblja ima glavni zadatak odnosno obavezu da osigura sigurnost radnika koji obavljaju sanaciju čišćenja zahvaćenog dijela mora ili morske obale (Vinnem i sur. 1999). Uz brigu za sigurnost radnika, zapovjednik intervencije je dužan osigurati i zaštititi kontaminirano mjesto od građana i obližnjeg stanovništva kako ne bi došli u doticaj s uljem ili opasnom supstancom te na taj način ugrozili vlastiti život. Također zapovjednik mora obavijestiti stanovništvo o incidentu te dati sigurnosne mjere i upozorenja. Najvažnije je djelovati u okviru „zlatnoga“ sata. To znači da su prve reakcije i poduzete akcije od presudnog značenja za brzo čišćenje i održivost same sigurnosti. Kod nezgoda brodova za prijevoz tekućeg tereta javljaju se dvije najvjerojatnije opasnosti koje mogu ugroziti okoliš, a ponajviše sam ljudski život. Obje opasnosti je potrebno zasebno odvojiti i analizirati, kako bi se osigurala sigurnost operativnog osoblja. Najvjerojatnije dvije opasnosti jesu:

- požara i eksplozije,
- otrovne ili zapaljive pare.

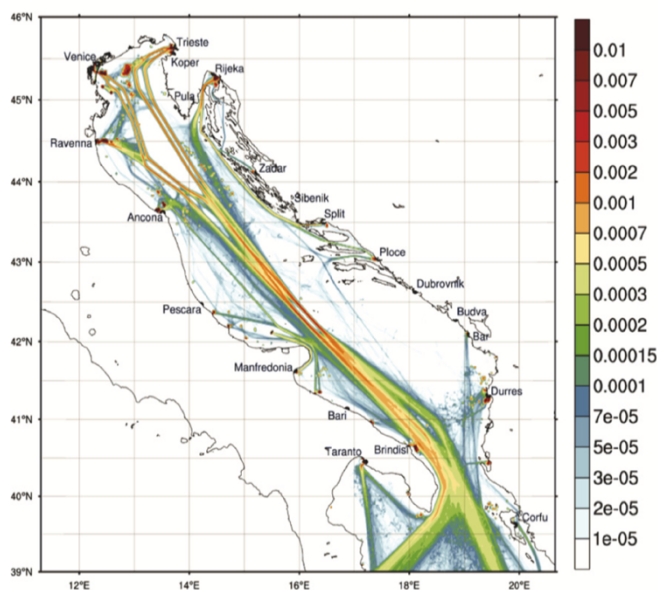
U daljnjim poglavljima će se detaljno analizirati navedene opasnosti zajedno sa specijaliziranom opremom za uklanjanje onečišćenja ulja s morske površine i s morske obale.

Također, moguće je odrediti vjerojatnost nastanka pomorske nezgode. Najčešća primjena je s pomoću određivanja gustoće prometa, to jest broja brodova na promatranom akvatoriju. Veći broj ruta i veći broj brodova, rezultira većom vjerojatnosti od nastanka pomorske nezgode, a s time i mogućnost onečišćenja prirode ili okoliša.



Slika 8. Prosječna gustoća u broju brodova po  $\text{km}^2$  u intervalu 2017. – 2020. (Liubartseva i sur. 2023).

Slika 8. prikazuje prosječnu gustoću prometa tijekom četiri godine od 2017. do 2020. izražene u broju brodova/(god\* $\text{km}^2$ ). Slika prikazuje sve vrste plovila na području Jadranskoga mora.



Slika 9. Prosječna gustoća po broju brodova po  $\text{km}^2$  za prijevoz tekućeg tereta na području Jadranskog mora (Liubartseva i sur. 2023).

Nastavno na prethodnu sliku 8., slika 9. prikazuje gustoću brodova na prometnim pravcima tankera – brodova za prijevoz tekućega tereta, koji su povijesno najviše utjecali na onečišćenje mora i priobalnog akvatorija. Treba naglasiti kako se, na prikazanim slikama, vertikalna

ljestvica na vremenskoj skali razlikuje. Crvena linija označava početak ograničenja pandemije COVID-19.

## 2.7. Specijalizirana oprema za uklanjanje onečišćenja

Metode odnosno akcije intervencija i primjena specijalizirane opreme kod iznenadnih onečišćenja mora u pravilu bi trebale biti pomno planirane kako bi bile što prihvatljivije za okoliš. Kod prijašnjih pomorskih nezgoda nerijetko se događalo da intervencije čišćenja više naštete morskom okolišu nego samo ulje koje se u tom trenutku nalazi na morskom području (Guo i sur. 2019). U nastavku slijedi analiza i specifikacija najčešćih uporaba specijalizirane opreme u trenucima pomorskih nezgoda na moru koje rezultiraju onečišćenjem. Cilj analize specijalizirane opreme je usporedba između pojedinih mehanizama i učinkovitosti posebnih uređaja za sprječavanje širenja i prikupljanje ulja s morske površine. Treba voditi računa da pojedina specijalizirana oprema koja je namijenjena za sprječavanje onečišćenja mora ima svoja ograničenja uslijed oceanografskih i klimatskih uvjeta na morima. Iz tog razloga je vrlo važno da stručno osoblje zna prepoznati visinu valova, brzinu morske struje i viskoznost ulja. Prepoznavanjem navedenih karakteristika ulja olakšava se odabir specijalizirane opreme koje će omogućiti uklanjanje ulja na brži, učinkovitiji i sigurniji način te spriječiti njegovo daljnje širenje po morskoj površini (OPRC 2005). U poglavlju koji slijedi bit će analizirana sljedeća specijalizirana oprema za reagiranja na iznenadna onečišćenja mora s najvažnijim tehničkim karakteristikama i obrazloženjima:



specijalizirana plovila opremljena s opremom za sprječavanje onečišćenja mora,



brane,



skimmer uređaji za prikupljanje ulja s morske površine,



pumpe,



spremnici za prihvat prikupljenog ulja.

Kod upotrebe skimmera koji nisu ugrađeni na brod treba voditi računa o sljedećim karakteristikama kako bi uređaj učinkovito prikupljao onečišćenje, to jest ulje s površine mora: svaki skimmer uređaj ima različitu brzinu prikupljanja ulja koja se mjeri u  $m^3/h$ ; skimmer mora

imati odgovarajuću pumpu koja će prenositi ulje do tanka ili druge vrste opreme za zbrinjavanje onečišćenja, i posljednje, mora imati agregat koji pokreće cijeli pogon. Odabir odgovarajuće pumpe je vrlo bitan segment. Prema (He i sur. 2022), usisna visina pumpe  $h$ , ovisi o tlaku i gustoći tekućega fluida, a u ovom slučaju ovisi o gustoći razlivenog ulja te se može prikazati na sljedeći način:

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} = \frac{10^5}{1000 \cdot 9.81} \cong 10.2 \text{ m} \quad (2)$$

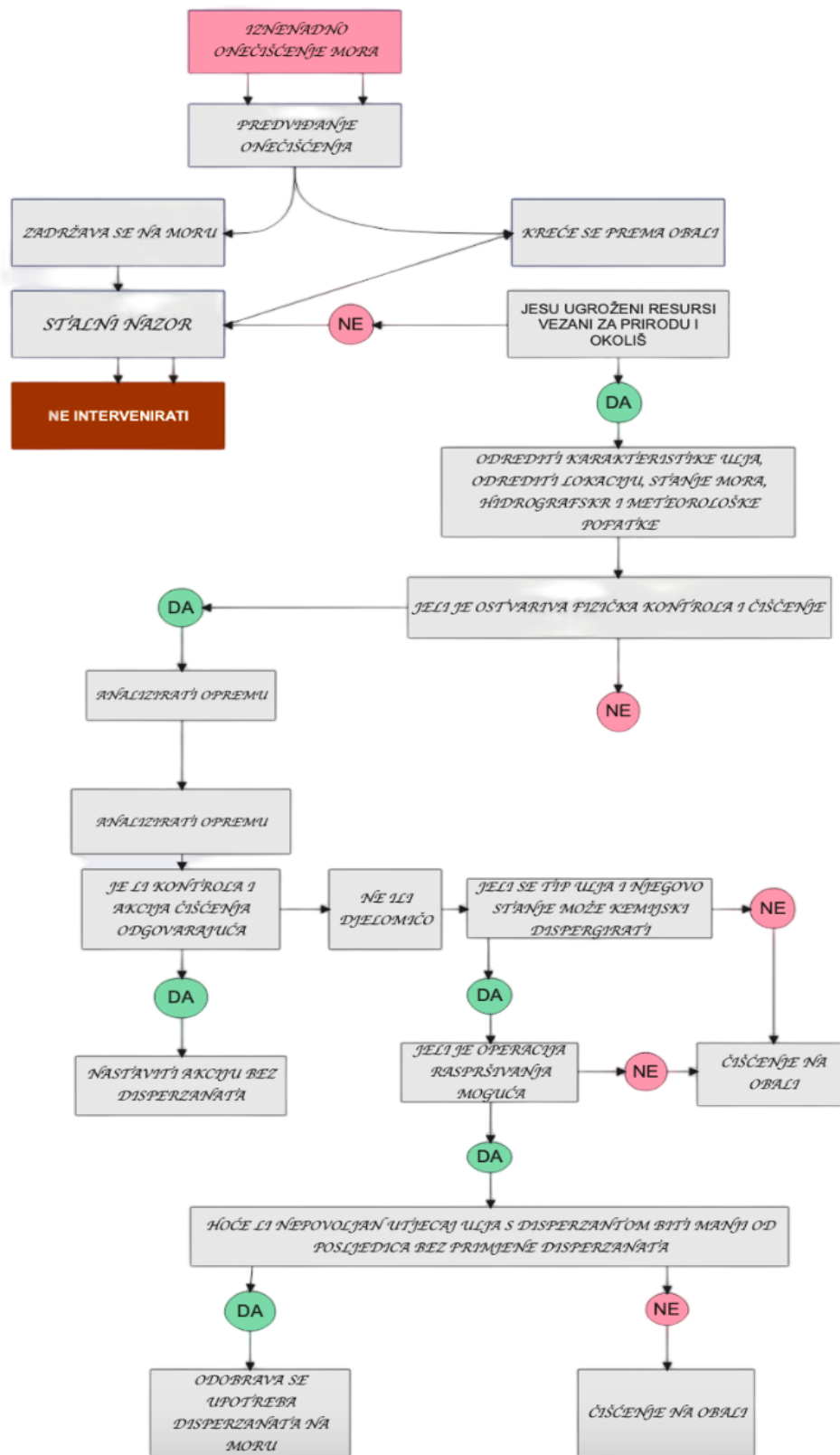
gdje su:  $P$  atmosferski pritisak izražen u  $10^5$  Pa;  $g$  je ubrzanje gravitacije koje iznosi  $9.81 \text{ m/s}^2$  i  $\rho$  je gustoća razlivenog ulja u  $\text{kg/m}^3$ .

Nadalje, moguće je izračunati gubitak energije  $E_f$  sljedećim izrazom (Ozretić, 1996):

$$E_f = \sum_{i=1}^n \left( \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{C_i^2}{2} \right) + \sum_{i=1}^n \left( \xi_i \cdot \frac{C_i^2}{2} \right) [J/kg] \quad (3)$$

gdje su:  $\lambda_i$  koeficijent otpora trenja,  $\xi_i$  koeficijent otpora osigurača,  $L_i$  duljina pumpe koja je izražena u metrima,  $d_i$  promjer pumpe izražen u metrima,  $C_i$  je brzina protoka tekućine, to jest ulja u  $\text{m/s}$ .

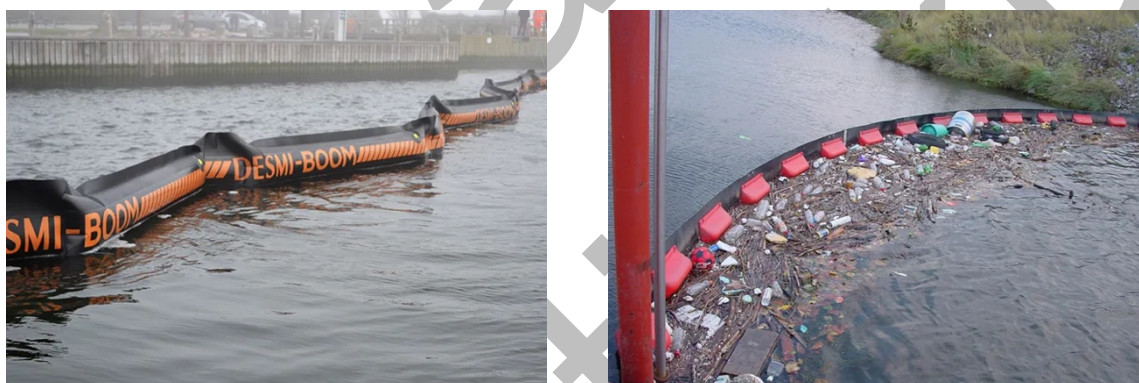
Nadalje slijedi dijagram toka vezan za proces donošenje odluke kod upotrebe disperzanata.



Slika 10. Proces donošenja odluke vezano za korištenje disperzanata (dorađeno i prilagođeno prema Dorčić, 1987).

## 2.8. Uporaba zaštitnih brana

Brane su posebno izgrađena vrsta opreme za reagiranje na uljna onečišćenja mora koje se koriste kao plutajuća barijere za kontroliranje kretanja i širenja ulja po morskoj površini. S pomoću brane uljna mrlja se zaokruži i time se ulje koncentrira u jednom području, odnosno ulje se ne širi dalje po površini mora pa je prikupljanje izrazito lakše. Za proaktivno zaštićivanje posebno ugroženih mjesta koji su od izrazite gospodarske važnosti kao što mogu biti luke, plaže s hotelima, biološko osjetljiva područja, brane se postavljaju tako da sprječavaju prodor ulja na spomenuta područja. Da bi bilo koja vrsta brane bila što učinkovitija brana se mora postaviti tako da slijedi kretanje valova, odnosno da njezin gornji dio ne spušta ispod površine ulja, a donji dio brane koji se naziva rub zavjese mora biti ispod donjeg ruba ulja (Dorčić, 1987). Uspješnost brane u sprječavanju onečišćenja mora ovisi o uvjetima u kojima se određena brana upotrebljava i sigurno je da će svaka brana u jako lošim uvjetima mora zakazati i propustiti određenu količinu ulja.



Slika 11.

a) Brana zavjesa

b) Brana ograda

(Desmi, 2024).

Brana ograda u odnosu na branu zavjesu se puno brže razvlači po morskoj površini, dok je brana zavjesa puno prikladnija pri valovitom području. Plivajuće brane u pravilu se sastoje od sljedećih komponenata:



plovnog dijela kojemu je funkcija sprječavanje širenja ulja;





podvodne zavjese kojoj je glavna funkcija sprječavanje prolaska ulja ispod površine vode;



uzdužnog pojačanja uz pomoć lanaca, čeličnog užeta koji pojačava mehaničku otpornost brane;



uteg za održavanje okomitoga položaja podvodne zavjese (Dorčić, 1987).

Matematički izraz krivuljastog modela za dio plutajuće brane koji se temelji na svom prostornom položaju  $\xi(s)$  s dvije koordinate  $x$  i  $y$  na morskoj površini je (Ehrhardt i sur. 2015):

$$\xi(s) = (x, y)(s), \quad s_A \leq s \leq s_B \quad (4)$$

$s_A$  i  $s_B$  predstavljaju krajnje točke promatrane brane. Derivacija od  $\xi(s)$  glasi:

$$T(s) = \frac{d}{ds} \xi(s) \quad (4.1)$$

Normalni vektor  $N(s)$  je definiran kao:

$$\frac{d}{ds} T(s) = \frac{N(s)}{R(s)}, \quad \text{gdje je } R(s) = \frac{1}{\left\| \frac{d}{ds} T(s) \right\|} \quad (4.2)$$

S pomoću vektora matematički se dobivaju iznos, smjer i orijentacija vjetrova i morskih struja koje djeluju na postavljenju branu u moru. Moguće je izračunati do koje jačine vjetrova i morskih struja će brana biti učinkovita pri zadržavanju kretanja ulja. Jačinu odnosno stres na površinu brane moguće je izračunati sljedećim izrazom:  $Fint(s) = t(s) \cdot T(s)$ ,  $t(s)$  predstavlja napetost postavljene brane (Ehrhardt i sur. 2015). U akvatoriju gdje se nalazi ulje uzima se u obzir udarna snaga vjetrova na branu te jačina morske struje. S obzirom na spomenute parametre se

odabire brana koja može biti zavjesa prilikom jačeg vjetrova ili brana ograda u slučajevima brze intervencije na uljna onečišćenja.

U slučajevima kod iznenadnog onečišćenja morske površine, potrebno je dobiti što točnije informacije o vrsti pomorske nezgode. Vrlo je važno dobiti informacije koja vrsta ulja onečišćava određeno područje. Tako operativno osoblje primjenjuje određene tehnike sprječavanja širenja ulja dalje po morskoj površini te ako se radi o ulju koje ima karakteristike opasnoga tereta postupa se po planu intervencije za taj teret. Inicijalne informacije mogu doći i do obližnjeg stanovništva, a operaterima je zadatak pitati i dobiti što više informacija o samoj pomorskoj nezgodi kako bi saznali vrstu tereta i karakteristika broda te sukladno tome poduzeli potrebne akcije za čišćenje. Prva akcija koja se poduzima kod sudara brodova za prijevoz tekućeg tereta je prebacivanje ulja iz probijenih tankova u ne oštećene tankove broda ili u privremene tankove na moru (ako je to moguće). Zapovjednici su dužni u takvim situacijama dati sve potrebne informacije o vrsti pomorske nezgode, vrsti tereta koju prevoze, ima li ozlijeđenih na plovilu te je li određeni dio broda zahvaćen požarom (Oil Pollution, 2005). Nakon dobivenih potrebnih informacija operativno osoblje ima pet glavnih opcija za intervenciju kod iznenadnih onečišćenja morske površine:

- ☞ akcija bez intervencije operativnog osoblja na terenu (u slučajevima ako se ulje ne kreće prema gospodarskim važnim resursima pojedine države, ako je riječ o nepostojanom ulju koje će se prirodnim putem disperzirati, ili ako vremenske prilike ne dozvoljavaju izlazak operativnog osoblja na teren zbog ugrožavanja vlastite sigurnosti);
- ☞ prikupljanje i sprječavanje širenja ulja s pomoću specijalizirane opreme;
- ☞ korištenje kemijskih metoda primjenom disperzanata koji imaju funkciju raspršiti ulje, odnosno razbijaju ulje u čestice te se time pospješuje prirodna razgradnja;
- ☞ metoda spaljivanja pri kojoj se moraju koristiti vatro zaštitne brane i specijalizirana plovila s uvježbanim osobljem te
- ☞ pustiti ulje da zahvati određenu stranu obale (ako vremenske prilike ne dozvoljavaju čišćenje na moru ili se procjeni da su troškovi sanacije jeftiniji tada se ulje pusti da dopluta do obale gdje se naknadno čisti s obale).

Operativno osoblje, na čelu sa zapovjednikom akcije čišćenja zagađenja, mora voditi računa o opasnostima kod intervencija na onečišćenom području. Jedna od opasnosti koja prijete prilikom sanacije je reakcija ugroženih životinja koje pod utjecajem šoka mogu biti nasilne

prema čovjeku koji im pokušava pomoći (Oil Pollution, 2005). Iz toga slijedi da se područje koje je zahvaćeno uljem treba posebno osigurati i staviti obavijesti upozorenja. Također, treba paziti na nepovoljne vremenske uvjete, hladnoću, vrućinu, vjetar koji mogu otežati akcije intervencije na iznenadna onečišćenja mora. Postupci za sprječavanje širenja ulja mogu se poduzeti i prije samog izljeva, a to je i praksa na mjestima gdje postoji potencijalna opasnost od izlivanja (blizina luka) i ugrožavanja bitnih resursa jedna države (Dorčić, 1987). Intervencija na iznenadna onečišćenja mora, trebale bi se izvršavati u timu. S time se postiže dodatna sigurnost. Osoblje koje obavlja akcije intervencije čišćenja, prikupljanja ulja s mora ili s obale mora nositi odgovarajuću zaštitnu opremu. Oprema koja se sastoji od specijaliziranih rukavica, kacige, radnih cipela s ne klizajućom podlogom, zaštitne naočale koje štite od špricanja ulja u oči, radno odijelo i druga oprema koja je potrebna za provođenje akcije čišćenja. Ako dođe do doticaja ulja s kožom potrebno je odmah isprati s čistom vodom te se obratiti liječniku za daljnje upute. Također treba voditi račune o vrsti obale i na taj način primijeniti odgovarajuću opremu za prikupljanje i sprječavanje mogućeg većeg onečišćenja. Uz pravilne razmake za odmor, uz dobru organizaciju svrstavanja otpada te prethodno sve navedeno dovodi do veće sigurnosti operativnog osoblja koje vrši akcije čišćenja.

## 2.9. Specijalizirana plovila za sprječavanje onečišćenja mora

Specijalizirana plovila su izgrađena za reagiranje na morima uslijed onečišćenja te se mogu primijeniti za:



sprječavanje širenja i sakupljanje razlivenog ulja na morsku površinu s uporabom brana i uređaja za prikupljanje ulja;



raspršivanje kemijskih sredstava, odnosno disperzanata;



privremeno skladištenje prikupljenog ulja do prijevoza do luke prihvata;



transfer sakupljenog ulja u drugo plovilo, ili u tankove na brodu ili luci

(Vesseltracker, 2024).



Slika 12. Specijalizirani brod za prikupljanje onečišćenja na moru (Safety4sea, 2020).

Slika 12. prikazuje specijalizirano plovilo namijenjeno za reagiranje na iznenadna onečišćenja mora. Plovilo je opremljeno sa skimmerima, uređajima za prikupljanje ulja, i dizalicama koje omogućuju odstranjivanje većih objekata s mora. Pojedina država ima vlastiti pristup i zahtjeve vezane za određivanje karakteristika specijaliziranih brodova za reagiranje na iznenadna onečišćenja mora.

Specijalizirani brodovi za reagiranja na iznenadna onečišćenja mora se razlikuju prema glavnim karakteristikama:



brzini plovidbe broda,



veličini spremnika / tanka za ukrcaj prikupljenog ulja,



brzini skimmer uređaja za prikupljanje ulja i drugih onečišćenja,



troškovima bunkera i drugih operativnih troškovi.

Sve navedene karakteristike su primijenjene u modelu kod optimiziranja broja brodova za reagiranje na onečišćenje priobalnog dijela akvatorija.





Slika 13. Specijalizirani brod za prikupljanje onečišćenja  
Brod. Eko 2000, Dezinskcija Rijeka.

Na slici 13. je prikazan specijalizirani brod na području Kostrene u Primorsko-goranskoj županiji dok je vršio nadzor i pregled postojanja onečišćenja.

Glavne karakteristike broda su: dužina koja iznosi 14.70 m, brzina plovidbe je 10 čvorova te ima zapremninu tanka od 10 m<sup>3</sup>. Nadalje, vrlo je važna geografska raspodjela specijaliziranih brodova.



Slika 14. Specijalizirano plovilo, dodatno opremljeno za suzbijanje požara na moru te priobalnom akvatoriju.

Određeni brodovi (npr. tankeri) prevoze zapaljive terete. U slučaju onečišćenja može doći do zapaljenja plinova te može nastati požar i/ili eksplozija. Pojedine države imaju specijalizirana plovila (slika 14.) koja imaju posebnu oplatu i posebna sredstva kako bi spriječilo daljnje gorenje koje bi moglo izazvati veću opasnost za okoliš i ljudsko zdravlje.

## 2.10. Troškovi sanacije

Treba spomenuti važnost naknade troškova, to jest troškova sanacije i štete uzrokovano onečišćenjem priobalnog dijela akvatorija. U pravilu, ako nije drugačije ugovoreno, onečišćivač snosi troškove nastale onečišćenjem morskoga okoliša. Troškovi obuhvaćaju sljedeće stavke:

- svi troškovi zaštitnih mjera koji su nastali zbog sprječavanja daljnjeg onečišćenja mora i obala, također bilo koji gubitak ili šteta prouzročena ovim mjerama,
- troškovi procjene onečišćenja zahvaćenoga područja,
- troškovi uzorkovanja, laboratorijska analiza mora i po potrebi zraka uslijed onečišćenja,

- troškovi razumnih mjera koje su poduzete s ciljem zaštite mora od onečišćenja ili će se poduzeti ponovno uspostavljanje ili nadomještanje prijašnjeg stanja morskog okoliša,
- naknadu troškova koji se mogu obračunati za štete i posljedice nastale na zaštićenim prirodnim vrijednostima i
- nadoknada za oštećenje imovine subjekata u provedbi Plana intervencija.

Zahtjev za nadoknadu štete zbog onečišćenja morskog okoliša koju su prouzročili plovni objekti koji prevoze ulje ili tvar koja sadrži ulje, podnosi se protiv vlasnika broda odnosno brodarka na temelju Pomorskog zakonika, Međunarodne konvencije o građanskoj odgovornosti za štetu zbog posljedica onečišćenja uljem i Međunarodne konvencije o osnivanju međunarodnog fonda za naknadu štete uzrokovane onečišćenjem uljem (Zaštita Jadrana – plan intervencija, 2021). Dalje, potrebno je naglasiti obaveze vezane za informiranje javnosti. Zapovjednik Stožera ili zapovjednik Županijskog operativnog centra, odnosno osoba koju zapovjednik zaduži, informira javnost o pojavi onečišćenja mora kao i o svim poduzetim radnjama čišćenja i sprječavanja daljnjeg onečišćenja mora. Informiranje javnosti o onečišćenju obavlja se dnevno na osnovi tiskovnih konferencija i izjava za medije putem javnih glasila i ostalih medija. Zakonski se pojavljuju određene forme, ugovorne obaveze koje definiraju odgovornost pomorskih subjekata u slučaju onečišćenja mora. Postoje obrasci koji se izdaju na zahtjev, a popunjavaju ih sljedeći bitni subjekti:

1. brodovlasnik,
2. osiguravatelj predmetnog broda.

Primjer takvog sporazuma je Međunarodni Fond za naknadu onečišćenja uljem iz 1992. godine. Zahtjevi za štetu zbog onečišćenja postojanim uljem, to jest teškom sirovom naftom iz brodova koji prevoze tekući teret regulirani su Konvencijom o građanskoj odgovornosti iz 1992. godine te Konvencijom o Fondu iz 1992. godine (Međunarodna konvencija o građanskoj odgovornosti za štetu zbog onečišćenja uljem iz 1992. godine). Navedene štete će biti pokrivena ako su zadovoljene sljedeće stavke:

- a) sve štete nastale onečišćenjem s uljima u državama koje su ratificirale Konvenciju o građanskoj odgovornosti i Konvenciju o Fondu iz 1992. godine,
- b) podnositelji zahtjeva moraju dostaviti popratnu dokumentaciju i sve druge dokaze kojima dokazuju svoj gubitak i nastale štete i

- c) tuženici moraju moći dokazati da su poduzete sve razumne mjere kako bi se izbjegla šteta ili ublažili njezini učinci.

Treba istaknuti kako u ugovorima za naknadu štete treba ispuniti sljedeće bitne stavke:

- vrijeme nastanka štete i pomorske nezgode,
- ime zastupnika broдача: popunjavajući klauzulu,
- razumna visina troškova za nadoknadu,
- isplate po postotku i
- drugi zahtjevi koji se mogu nadodati/tražiti (IOPC FUNDS, 2018).

## 2.11. Prethodno razvijeni modeli

U svrhu najbrže remedijacije nužno je upotrijebiti adekvatnu količinu i raspodjelu opreme. Cilj istraživanja (Đorđević i sur. 2022) bio je dobiti statistički značajne rezultate koji pomažu odrediti prednosti i nedostatke pojedinih skimmera te njihovu upotrebljivost u različitim situacijama onečišćenja mora uljima. Nadalje, prikazano je da skimmer disk učinkovitiji prilikom prikupljanja nepostojanog ulja, dok skimmer četka je učinkovitija prilikom sakupljanja postojanog ulja. Isto tako, prikazana je ovisnost jačine pumpe i odabranog skimmera, odnosno, brzina sakupljanja ulja s morske površine ovisi i o snazi pumpe. Predloženi model prikazuje optimalni izbor različitih skimmera s različitim vrstama pumpa tako da prikupljanje ulja bude što je brže moguće.

Dhaka i sur. (2021) su kao primarni cilj imali poboljšati učinkovitost mehaničke opreme za zaštitu od izlivanja ulja. Predmet optimizacije su bili oleofilni skimmeri. Nedostatak modela je što su autori uzeli u obzir samo samostalne skimmere, dok navedeni model ne podržava specijalizirane brodove za reagiranja na onečišćenja mora.

Za što bržu sanaciju predložen je optimizacijski model koji se odnosi na pozicioniranje specijaliziranih brodova u lukama, tako da brodovi što brže mogu doploviti do pozicije onečišćenja (Łazuga i sur. 2018). Razmotreno je više mogućih mjesta onečišćenja na području poljskog priobalja i Baltičkog mora. Koristeći genetski algoritam izračunato je vrijeme koje je potrebno pojedinom brodu od luke do određenog mjesta onečišćenja. Međutim, model ne prikazuje vrijeme koje je potrebno pojedinom brodu da prikupi onečišćenje i stoga ne minimizira vrijeme sanacije.



Weiwei i sur. (2015) su za cilj istraživanja postavili problem sanacije iznenadnog onečišćenja mora na zadanom području. Varijabla od interesa koja se uzima u obzir prilikom sastavljanja modela je početni volumen izlivenog ulja. Pretpostavlja se da je izlijevanje ulja kontinuirano i sa stalnom brzinom. Na kraju se ubacuje trajanje ispuštanja ulja na morsku površinu, no nije riješena minimizacija trajanja sanacije. Nadalje, analizirali su fizikalne i kemijske parametre ulja i morske vode. Predložen je model pod nazivom „MIDO“ koji izvršava optimizaciju s pomoću cjelobrojnog programiranja. Funkcija cilja je bila minimizacija troškova prilikom sanacije onečišćenja. Nedostatak modela optimizacije je taj što autori nisu uzeli u obzir minimizaciju vremena sanacije.

Sličan model bio je predložen i od strane Zhang i sur. (2019), ali bez cilja skraćivanja vremena sanacije. Potonji autori su razvili model za sustav plutača za praćenje izlivenog ulja. Optimizacija je zasnovana na satelitskom navigacijskom sustavu Compass. Cilj je predvidjeti kretanje ulja i što prije reagirati sa specijaliziranom opremom na potencijalno ugroženom mjestu. Nedostatak modela je što ne uzima u obzir starenje ulja, vrstu ulja i kapacitete pojedine opreme za prikupljanje ulja s morske površine te stoga ne minimizira vrijeme skupljanja ulja. Dodatno, postoji potreba za klasificiranjem i ispravnim adresiranjem odgovarajuće opreme za pojedinačne zagađivače.

Prethodna istraživanja (Vetere i sur. 2021) su pokazala nedostatak razmatranja važnosti kapaciteta crpki u odnosu na skimmere. U istraživanju (Dhaka i sur. 2021) autori raspravljaju o važnosti korištenja skimmera i druge specijalizirane opreme kao što su brane za sprječavanje širenja ulja.

## **2.12. Procjena kretanja uljne mrlje u priobalnom moru**

U slučaju da je izliveno ulje lakše od morske vode, što je najčešće slučaj, ono će se širiti i kretati po površini mora. Stoga je posadama brodova koji kreću u sanaciju, odnosno skupljanje ulja, važno znati gdje je mrlja otputovala i koliko se proširila od mjesta izljeva do trenutka kad do nje stignu.

U slučaju da ulje ima veću specifičnu težinu od morske vode na površini, ulje će potonuti i time izlazi iz dosega operacije skupljanja.

### 2.12.1. Širenje uljne mrlje

Od trenutka izljeva na površinu mora, ulje se širi u obliku mrlje. Širenje je rezultat dviju sila: gravitacije zbog koje ulje nastoji izravnati gornju površinu s površinom mora i površinske napetosti morske vode koja je često veća nego uljna. Stoga je u okviru prvog sata nakon izljeva širenje mrlje brže jer je tada dominantna sila gravitacija, a kasnije se mrlja širi sporije kad dominira površinska napetost mora.

U slučaju mirnog mora, bez struja i valova, promjer mrlje se može izračunati (Dorčić, 1987) iz izraza:

$$d(t)^3 - d_0^3 = \frac{24}{\pi} K (\rho_w - \rho_o) \frac{\rho_o}{\rho_w} V_o t \quad (5)$$

gdje je:  $d(t)$  = promjer mrlje u trenutku  $t$ ;  $d_0$  = promjer mrlje u vremenu  $t = 0$ ;  $\rho_w$  = gustoća vode;  $\rho_o$  = gustoća razlivenog ulja na morskoj površini;  $V_o$  je volumen razlivenog onečišćenja, to jest volumen ulja i  $K$  je konstanta, na primjer  $250 \text{ s}^{-1}$  za sirovu naftu Srednjeg istoka. Prema navedenom izrazu,  $1 \text{ m}^3$  sirove nafte pokriva područje od  $10 \text{ m}^2$ , uz debljinu sloja  $d$   $0.1 \text{ m}$  na početku, a to je krug promjera  $3.6 \text{ m}$ . To znači da će se nakon 10 minuta ulje proširiti u krug promjera  $48 \text{ m}$  uz debljinu filma od  $0.5 \text{ mm}$ . Nakon 100 minuta uljna mrlja će biti krug promjera  $110 \text{ m}$  uz debljinu filma od  $100 \mu\text{m}$ . Nadalje, Fay (1969), uz pretpostavku da uljna mrlja nije pod utjecajem vjetra i valova, daje sljedeći izraz za izračunavanje maksimalne površine na koju će se ulje razliti:

$$A_{max} = \pi r_{max}^2 = 10^5 V^{0.75} \quad (5.1)$$

Gdje je  $A_{max}$  maksimalna površina u  $\text{m}^2$ , a  $V$  predstavlja volumen izlivenog ulja u  $\text{m}^3$ .

Debljina uljnog filma pri maksimalnom širenju bit će:

$$S = \frac{V}{A_{max}} \text{ [m]} \quad (5.2)$$

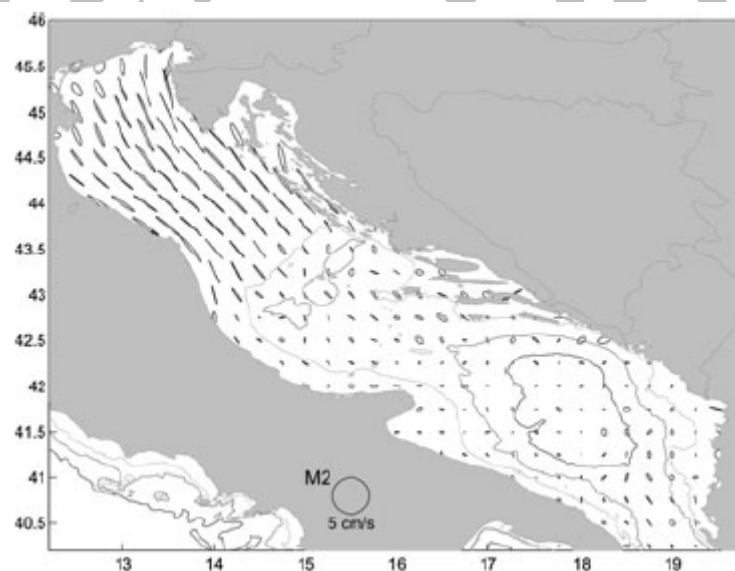
Na gornji izračun valja dodati i turbulentnu difuziju koja uzrokuje širenje mrlje za otprilike 2 cm/s pa će nakon 10 minuta mrlja poprimiti dijametar od 72 m, a za 100 minuta dijametar od 350 m.

### 2.12.2. Gibanje uljne mrlje na površini mora

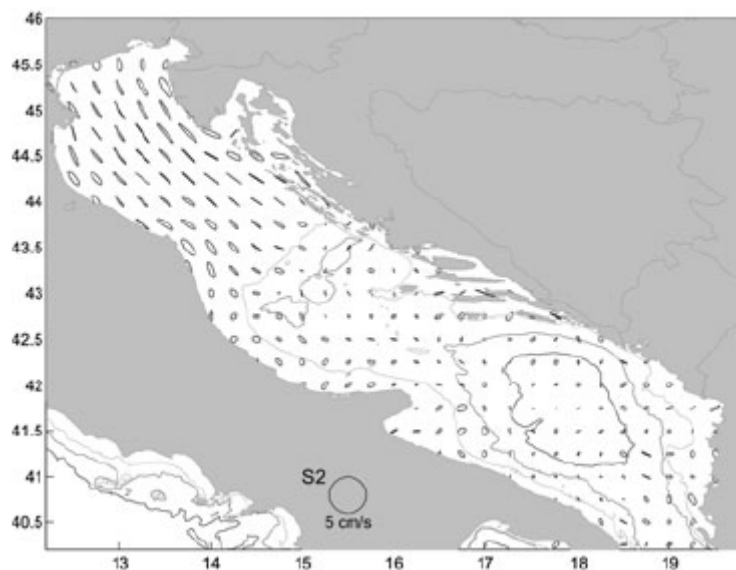
Istovremeno sa širenjem, mrlja se kreće po površini mora nošena morskim strujama. Morske struje su inducirane termohalinom dinamikom morskog stanja, plimotvornom silom i vjetrom nad površinom mora.

Termohalina dinamika inducira rezidualnu struju koja je u Jadranskom moru reda veličine oko 2 cm/s. Plimotvorna sila koja inducira porast nivoa mora (plimu) i pad nivoa mora ispod hidrografske nule (oseku), uzrokuje periodičnu struju. U Jadranskom moru plimotvorna sila ima sedam komponenata. Četiri komponente su poludnevne, a preostale tri komponente su dnevne. U gornjem Jadranu, poludnevna M2 komponenta s periodom od 12.42 h može postići amplitudu razine mora od 26 cm, a S2 komponenta s periodom od 12 h amplitudu od 16 cm. Dominantna K1 komponenta perioda 23.934 h može postići amplitudu do 20 cm (Poulain, 2013).

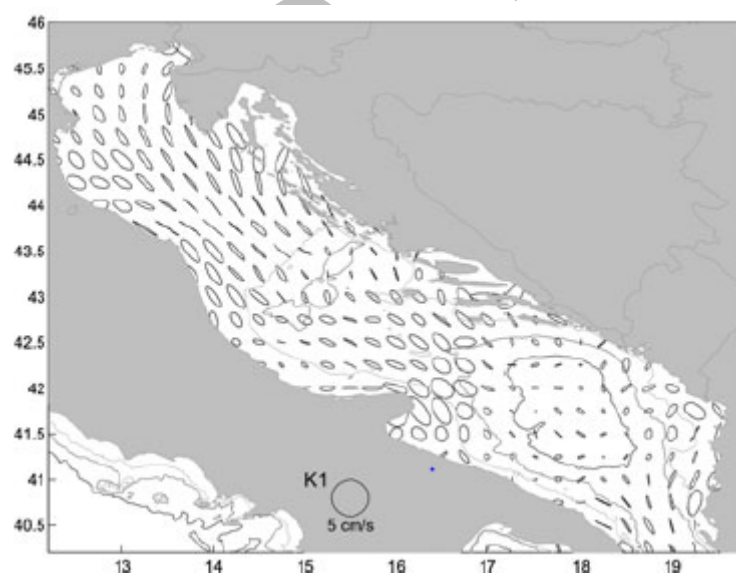
Rezultati istraživanja morskih struja uzrokovanih plimotvornom silom, uz pomoć površinskih plovaka, pokazuju kako izgledaju anvelope (elipse) periodične površinske struje (Slika 15.)



- a) Elipse morskih struja od K2 poludnevne komponente plimotvorne sile. Maksimum iznosi oko 6.6 cm/s i nalazi se uz istarsku obalu dok se minimum nalazi u srednjem i južnom Jadranu te iznosi < 2 cm/s.



- b) Elipse morskih struja od S2 poludnevne komponente plimotvorne sile. Maksimum iznosi oko 3.7 cm/s i nalazi se uz istarsku obalu dok se minimum nalazi u srednjem i južnom Jadranu te iznosi  $< 2$  cm/s.



- c) Elipse morskih struja od K1 dnevne komponente plimotvorne sile. Maksimum iznosi oko 4.8 cm/s i nalazi se uz istarsku obalu dok se minimum nalazi u južnom Jadranu te iznosi  $< 2$  cm/s.

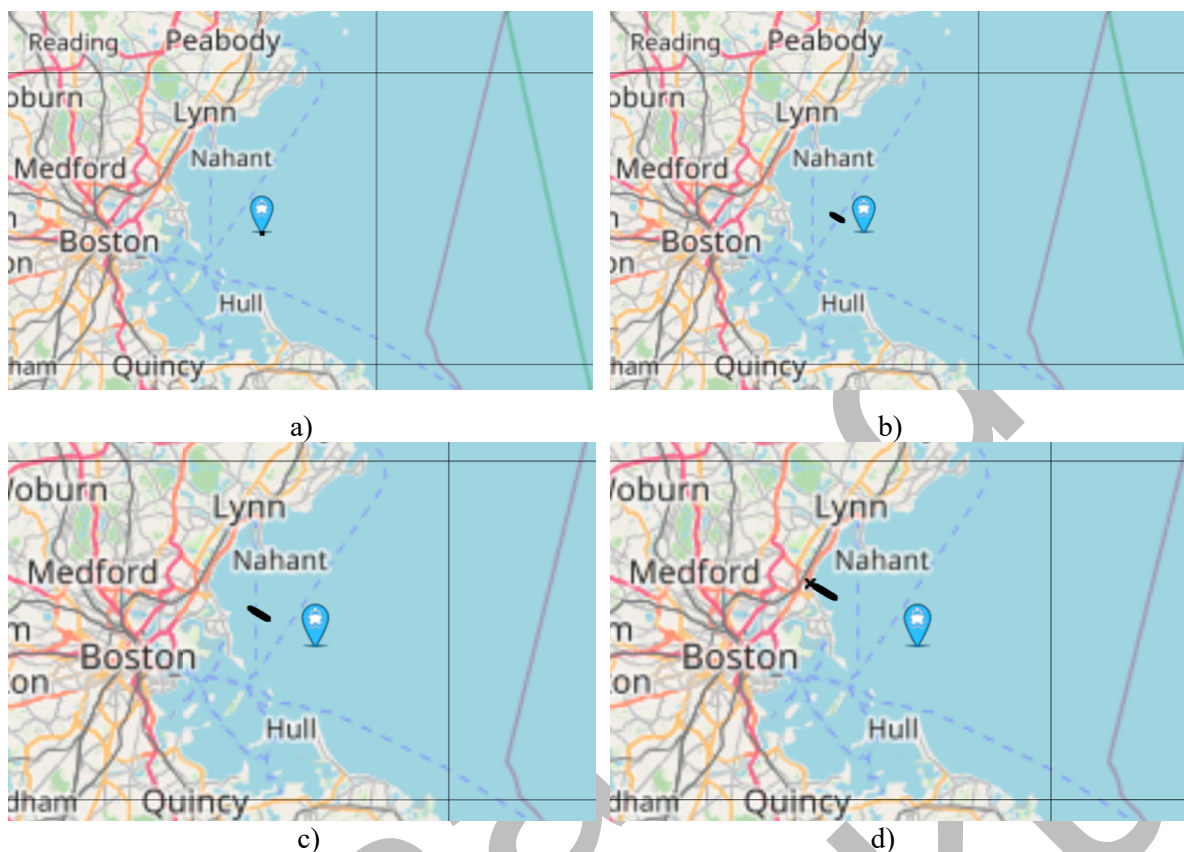
Slika 15. Elipse morskih struja koje potječu od K2, S2 i K1 komponenata plimotvorne sile (Poulain, 2013).

Iz slike 15. se vidi da sve tri dominantne komponente plimotvorne sile uzrokuju polarizirane struje u gornjem i srednjem Jadranskom moru s dominantnom osi u smjeru NW-SE. Na samom ulazu u Jadransko more, u Jonskom prolazu, su elipse usmjerene približno u smjeru N-S i značajno su manjeg intenziteta.

Rezultati analize direktnih mjerenja morskih struja tijekom sezone najjačih rezidualnih struja (25. 10. 2019.-10. 1. 2020.) u Velebitskom kanalu (Geček, 2023) pokazuju najveću vrijednost

površinskih struja od 4.96 cm/s u smjeru N (postaja Jablanac), 0.24 cm/s (Prizna), 2.76 cm/s u smjeru NW (postaja Karlobag) te 2.14 cm/s u smjeru SE (postaja Lukovo Šugarje). Također je zaključeno da su dominantne morske struje uzrokovane plimotvornom silom poludnevne komponente M2 te dnevne komponente K1 u smjeru N-S do 5 cm/s (Jablanac), u smjeru NW-SE do 6.5 cm/s (Prizna), u smjeru NW-SE do 5 cm/s (Karlobag), u smjeru NW-SE do 5 cm/s (Lukovo Šugarje). Nađene maksimalne vrijednosti iznosile su od 31.02 cm/s (Jablanac), 25.98 cm/s (Prizna), 31.2 cm/s (Karlobag) te 25.94 cm/s (Lukovo Šugarje). Iz analize direktnih mjerenja morske razine i struje (Geček, 2023) zaključuje da rezidualna struja u Velebitskom kanalu može imati intenzitet do 5 cm/s u smjerovima od NW do S. Struja inducirana plimotvornom silom ima uglavnom smjer NW-SE te brzinu do 6.5 cm/s. U slučajevima bez vjetra, ovo su dominantne struje koje uzrokuju gibanje uljne mrlje. U slučajevima s vjetrom morske struje postižu skoro peterostruko višu vrijednost, u Velebitskom kanalu do 31.2 cm/s. Međutim, vjetrom inducirane struje u Jadranskom moru mogu dostići i vrijednost do 50 cm/s za vrijeme puhanja bure od 10 m/s (Orlić i sur. 1992). U slučaju izljeva ulja u priobalnom moru izvan hrvatskih otoka i bez puhanja vjetra brzina gibanja mrlje se može trenutno odrediti iz derivacije prognoze razine mora koju daje Hrvatski hidrografski institut u okviru Portala operativne oceanografije.

Smjer se može očitati iz slike 15. (kad je derivacija pozitivna, smjer je NW a kad je negativna, smjer je SE). U slučaju puhanja vjetra nužno je zbrojiti i vektor brzine inducirane vjetrom u iznosu od 0.034 brzine vjetra (Fay, 1969). U priobalnom moru unutar hrvatskih otoka situacija je kompliciranija. U odsustvu puhanja vjetra, rezidualna i plimotvorna sila u jedan sat mogu pomaknuti uljnu mrlju za najviše 500 m što je zanemarivo imajući na umu da specijalizirani brodovi mogu stići do mrlje za najviše 2 sata. U slučaju puhanja vjetra kada specijalizirani brodovi mogu izaći na teren, mrlja će u jedan sat putovati uglavnom u smjeru puhanja vjetra oko 1 km u sat vremena. Prognoza smjera i brzine vjetra do 7 dana unaprijed se mogu očitati na portalu Državnog hidrometeorološkog zavoda. Preciznija alternativa bila bi koristiti hidrodinamički model predviđanja kretanja mrlje u moru. Međutim, u okviru hrvatske operativne oceanografije takav model trenutno ne postoji. U budućnosti bi se on mogao uspostaviti prilagodbom WebGnome sustava iz National Oceanic and Atmospheric Administration, SAD. Slijedi primjer simulacije kretanja mrlje sa sustavom WebGnome. Simulacija se pokreće zadavanjem uvjeta stanja mora i vjetra te izborom datoteka geometrije područja koji postoje samo za izabrana područja istočne i zapadne obale SAD.



Slika 16. Prikaz simulacije kretanja mrlje  
a) Trenutak izljeva ulja 18. 3. 2024. u 16:00 h; b) Geografska pozicija mrlje 18. 3. 2024. u 21: 45h; c) Geografska pozicija uljne mrlje 19. 3. 2024. u 2:30 h i d) Uljna mrlja dolazi na obalu 19. 3. 2024. u 9:30 h.

Iz navedenih slika se vidi put kretanja mrlje ulja od mjesta nesreće do finalne točke dodira s obalom nakon 17 sati i 30 min. Ukupni prijeđeni put uljne mrlje je 9 km. U model su zadani: volumen izlivenog ulja, brzina i smjer vjetera koji su najčešći za navedeno razdoblje godine, a također su zadani visina i smjer gibanja valova. Međutim, iz kretanja mrlje se vidi da širenje mrlje nije uzeto u obzir.

Manjkavost simulacije predstavlja i nemogućnost zadavanja vremenski ovisnih varijabli, već se one zadaju kao konstante. U praksi, vjetar može puhati na refule, a struje uzrokovane plimotvornom silom nisu uzete u obzir. Za točnije predviđanje bilo bi potrebno očitavanje i zadavanje dinamične prognoze za barem 6 sati unaprijed a preostali podaci karakteristika ulja bi se morali učitati iz baze podataka.

### 3. MATERIJALI I METODE

Optimizacijski problem koji je predstavljen u disertaciji riješen je s pomoću programskog alata Matlab\_R2020a. Navedeni programski alat koriste brojni inženjeri i znanstvenici diljem svijeta za izradu raznih aplikacija s primjenama u industriji, akademskim istraživanjima, uključujući metode kao što su:

- ⇒ strojno učenje,
- ⇒ obrada signala i komunikacije,
- ⇒ obradu slika i videa,
- ⇒ sustave upravljanja, testiranje i mjerenje te
- ⇒ računalne financije, računalnu biologiju i ekološko modeliranje.

Također, navedeni programski alat namijenjen je za rješavanje brojnih znanstvenih problema Matlabovim programskim jezikom (MathWorks, 2024).

Problem optimizacije predstavlja sustavno nalaženje maksimuma ili minimuma funkcije u ograničenom ili neograničenom prostoru varijable. U odnosu na varijablu optimizacija se dijeli na diskretnu i kontinuiranu optimizaciju. U odnosu na varijablu dijeli se na linearnu i nelinearnu optimizaciju. Napokon, moguće je postojanje više funkcija od kojih svaka definira jedan cilj. U tom slučaju se razmatra više-kriterijalna optimizacija. Problemi optimizacije se pojavljuju u svim kvantitativnim znanostima. U ovoj disertaciji primijenjena je cjelobrojna i multikriterijalna optimizacija.

Općeniti problem optimizacije se formulira na sljedeći način: neka je zadana funkcija  $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ , koja preslikava skup  $A$  u skup realnih brojeva. Traži se element  $x_0 \in A$  takav da je  $f(x_0) \leq f(x)$  za sve  $x \in A$ , što predstavlja minimizaciju ili takav da je  $f(x_0) \geq f(x)$  za sve  $x \in A$ , što predstavlja maksimizaciju.

Kako vrijedi:  $f(x_0) \geq f(x) \Leftrightarrow -f(x_0) \leq -f(x)$ , dovoljno je riješiti problem minimizacije. Često je skup  $A$  podskup Euklidskog prostora  $\mathbb{R}^n$  i definiran je skupom ograničenja koja elementi skupa  $A$  moraju zadovoljavati. Funkcija  $f$  se naziva funkcijom cilja.

U slučaju linearnog programiranja razmatra se problem pronalaska vektora  $x$  koji minimalizira funkciju.

$$\min \{f^T x\}$$
$$x$$

Ograničenja na varijablu  $x$  mogu biti:

- ◇  $Ax \leq b$  (ograničenja u obliku nejednakosti),
- ◇  $A_{eq}x = b_{eq}$  (ograničenja u obliku jednakosti),
- ◇  $lb \leq x \leq ub$  (ograničenja u obliku gornje i donje granice).

Nadalje, optimizacije koje su se uzimale u obzir su sljedeće:

☞ Cjelobrojna. Općenito:  $\min f(X), g(X) \geq h, X \in \{0,1\}^n, h \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$ . Linearna:  $\min (A^T X), B^T X \geq h, X \in \{0,1\}^n, A, B \in \mathbb{R}^n, h \in \mathbb{R}^m, n, m \in \mathbb{N}$ . Minimizacija može dovesti do više optimalnih rješenja  $D = \{X_1^*, \dots, X_r^*\}, r \in \mathbb{N}$ . Sva rješenja je potrebno naći kako bi se uz pomoć vanjske funkcije „troška“ (‘cost function’):  $p(X_1^*, \dots, X_r^*)$  moglo pokrenuti daljnju optimizaciju problema:  $\min p(X_1^*, \dots, X_r^*)$ . No, i dalje može preostati više optimalnih rješenja.

☞ Multikriterijalna, cjelobrojna:  $\min (A_1^T X; \dots, A_m^T X), g(X) \geq h, X \in \{0,1\}^n, A_i \in \mathbb{R}^n, h \in \mathbb{R}^m, m, n \in \mathbb{N}$ . Pri tom se ne može napisati  $\min (A^T X)$  gdje je  $A$  matrica dimenzije  $(m,n)$  jer je riječ o različitim kombinacijama nepoznate varijable  $X$  koje pojedinačno zadovoljavaju uvjete. Ovdje također postoji više dominantnih rješenja  $D = \{X_{1,1}^*, \dots, X_{1,r_1}^*; \dots, X_{n,1}^*, \dots, X_{n,r_m}^*\}$  i sva je potrebno naći jer ona definiraju kompletnu Paretovu granicu. Kompletna Paretova granica dominantnih rješenja je potrebna jer se uz definiciju vanjske funkcije troška mogu pronaći svi optimumi. Pri tom za skup optimalnih rješenja,  $O$ , vrijedi:  $O \subseteq D$ .

☞ Općeniti hijerarhijski algoritam (za kombinatorni problem): Kad se  $A_1, A_2, \dots, A_n$  ne mogu napisati u analitičkom obliku, nužno je algoritmu optimizacije za kombinatorni problem pristupiti hijerarhijski uz pomoć sukcesije strategija. Strategija 1: izbor svih kombinacija koje zadovoljavaju  $\text{alg}_1 \min (X_1)$  uz uvjet  $g_1(X) \geq h_1 \Rightarrow X_{1,1}^*, \dots, X_{1,r_1}^*$ . Strategija 2: izbor iz preostalih kombinacija koje zadovoljavaju  $\text{alg}_2 \min (X)$ , uz uvjet  $g_2(X) \geq h_2 \Rightarrow X_{2,1}^*, \dots, X_{2,r_2}^*$ . itd. do strategije  $m$ :  $\text{alg}_m \min (X)$  uz uvjet  $g_m(X) \geq h_m \Rightarrow X_{m,1}^*, \dots, X_{m,r_m}^*$ . Izbor iz kompletne Paretove granice dominantnih rješenja,  $\{D\}$ , se izvodi pomoću minimizacije eksterne funkcije troška ( $p$ ):  $\min p(\{D\})$  ili  $\text{alg}_{m+1} \min p(\{D\})$  uz uvjet  $g_{m+1}(\{D\}) \geq h_{m+1}$ . Za rezultanti skup optimalnih rješenja,  $O$ , također vrijedi:  $O \subseteq D$ .



Vektori moraju biti iste dimenzije inače se ne mogu množiti. Ako je dimenzija A i X jednaka 2:  $\dim A = 2$ ,  $\dim B = 2$ . Znači,  $A^T * X$ , to je  $a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n$  linearna funkcija od vektora X. Uvjet  $B^T * X$  je također jedna druga linearna funkcija od X. Naš uvjet je da njena vrijednost bude veća ili jednaka h (na primjer da ukupan kapacitet bude veći ili jednak volumenu mrlje). Sa  $X_1^*$ ,  $\dots$ ,  $X_r^*$  smo nazvali svih r rješenja problema minimizacije. Mi ne znamo koliki r može biti ali znamo da može biti  $> 1$ . Kad smo dobili svih r rješenja, što smo označili sa zvjezdicom, sada se pitamo: imamo li mi kakvu dodatnu funkciju za izbor među tim r rješenjima? Tu funkciju zovemo "funkcija troška"  $p(X^*)$ . Ta funkcija nema veze s troškom broda po satu. To je dodatna funkcija, s kojom, ako je imamo, možemo dalje smanjivati broj rješenja, i njih na koncu nazvati optimumima.

Nadalje, u disertaciji je obrazloženo i kroz primjere dokazano zašto je najbrža moguća reakcija na iznenadno onečišćenje ključna za sprečavanje širenja ulja po površini mora te otapanje u vodeni stupac i utjecaj na priobalne ekosustav mora i međuplimne zajednice. Predložen je model optimizacije koji će minimizirati broj brodova uz uvjet da zbroj njihovih kapaciteta bude veći ili jednak volumenu izlivenog ulja. Ta minimizacija može rezultirati u više optimalnih rješenja. U svrhu budućih optimizacija, nužno je bilo naći sva optimalna rješenja koja čine Paretovu granicu. Nakon toga je predložena maksimizacija brzine prikupljanja ulja, odnosno minimizacija vremena skupljanja, uz gornji uvjet na sumu kapaciteta. Navedena optimizacija može također rezultirati u više optimuma. Kao i u prethodnoj optimizaciji i ovdje je bilo nužno naći sva optimalna rješenja zbog potrebe preostalih minimizacija. Kako je bilo moguće da navedene minimizacije još uvijek ne dovedu do jedinstvenog minimuma vremena skupljanja ulja jer brodovi do onečišćenja u pravilu ne dolaze istovremeno, već u različitim trenucima, primijenila se hijerarhijska optimizacija koja je dovela do najkraćeg vremena skupljanja ulja s površine mora, što je ključno za smanjenje posljedica utjecaja akcidenta na ekosustav mora, odnosno kako bi se spriječio dolazak ulja do obale te time ugrozile među-plimne zajednice. Napokon, u skupu apsolutno ekvivalentnih (jednakovrijednih) optimalnih rješenja, primijenila se minimizacija realnog troška. Za direktne optimizacije upotrijebili su se softverski paketi u Matlabu koji se odnose na miješanu cjelobrojnu i više-kriterijsku optimizaciju. Za hijerarhijsku optimizaciju napisan je računalni program također u Matlabu. Cilj je bio smanjiti broj optimalnih rješenja do minimuma uz zadane kapacitete brodova, njihovu brzinu skupljanja ulja, vrijeme dolaska na mjesto onečišćenja, trošak broda po satu te definiciju upravljačkih prioriteta.

Nadalje, za rješavanja najkraćeg vremena sanacije koristile su se općenite i jedinstvene formule:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{v_i} + t_i \right) \min(1, t_i \cdot M) \rightarrow \min \quad (6)$$

$$\max\{t_1, \dots, t_n\} \leq M \quad (6.1)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i \cdot w_i \geq L - I \quad (6.2)$$

$$t_i \cdot w_i \leq C_i, \forall i = 1, \dots, n \quad (6.3)$$

$$t_1, \dots, t_n \geq 0 \quad (6.4)$$

Gdje su  $t_i, i = 1, \dots, n$ . varijable optimizacije koje predstavljaju vrijeme rada pojedinog broda na incidentu:

$d_i$  = udaljenost broda od lokacije akcidenta,  $v_i$  = brzina kretanja broda,  $M$  = konstanta,  $w_i$  = brzina prikupljanja broda,  $L$  = ukupna količina ulja,  $I$  = isparavanje.

Navedene formule su općenito sastavljene za rješavanja skraćivanja vremena sanacije u određenom akvatoriju. No, iz navedenog općenitog izraza je nemoguće ustanoviti hoće li izračun dati jedinstveno rješenje i koje će to rješenje biti. Nadalje, prije toga treba razmotriti što se minimizira i jesu li varijable točno ograničene. Primjerice, svaki brod ima točno zadan najveći  $t_i$  jer se zna kapacitet,  $k_i$ , i brzina skupljanja  $w_i$ , pa je  $k_i/w_i \leq t_i$  i ne može  $t_i$  biti bilo koja vrijednost  $t_i \geq 0$ . Naime  $t_i$  je vrijeme da se napuni tank, ali možda će se operacija dovršiti prije toga. Nadalje,  $C_i$  se znaju pa može  $t_i * w_i \leq C_i$ .

Kada razmotrimo,  $t_i + d_i/v_i$  daje ukupno vrijeme koje je potrebno za rad broda na incidentu, točnije,  $t_i$  je vrijeme rada broda na skupljanju +  $d_i/v_i$  vrijeme dolaska na akcident, međutim brod radi na akcidentu dok ne napuni tank i više ne može raditi. Dakle,  $t_i$  je ograničen na to vrijeme odnosno  $t_i \leq k_i/w_i$ . Prema tome, ukupno vrijeme se množi s minimizacijom  $t_i * M$  gdje je  $M$  konstanta takva da je najveći  $t$  po svim brodovima manji od  $M$ . Na koncu, zadnja suma ograničava skupljanje na  $\geq$  veličinu mrlje.

☞ Optimizacijski problem: slanje brodova prema minimalnom kapacitetu volumena tankova prema volumenu mrlje, uz što je moguće manji trošak  
 Neka je  $c_1, c_2, \dots, c_n$  označava kapacitet u  $m^3$  po pojedinom brodu. Minimizacijski problem formiramo tako da:

$$\min(f(x)) = \min(c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n) \quad (7)$$

Gdje su varijable  $x_1, x_2, \dots, x_n \in [0,1]$ .

Drugim riječima, ili je brod odabran za sudjelovanje u operaciji (1) ili nije (0). Problem minimizacije podliježe sljedećem ograničenju:

$$c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + \dots + c_n * x_n \geq V \quad (7.1)$$

Gdje je  $V$  volumen onečišćenja izračunat nakon isparavanja koji je određen od udaljenosti nesreće do pristajanja brodova i najveće brzine broda. Važno je istaknuti kako su brodovi označeni sa  $x_1, \dots, x_n$ , ako je  $x_i = 1$  poslat ćemo  $i$ -ti brod, a tamo gdje je  $x_j = 0$ ,  $j$ -ti brod nećemo

poslati. Problem je jednoznačno određen jer ako onečišćenje ima  $2 \text{ m}^3$  jedan brod ima  $10 \text{ m}^3$ , a drugi  $100 \text{ m}^3$ . Procedura će izabrati brod koji ima tankove  $10 \text{ m}^3$ . Rješenje je optimalno ako svi brodovi podjednako brzo mogu doći na mjesto onečišćenja i ako podjednako brzo skupljaju ulje.



Optimizacijski problem brodova koji najbrže stignu do mjesta onečišćenja

Neka je  $t_1, t_2, \dots, t_n$  vrijeme dolaska do mjesta onečišćenja od  $x_1, x_2, \dots, x_n$  raspoloživih brodova, odnosno, minimizacija problema se formulira na način:

$$\min(f(x)) = \min (t_1 * x_1 + t_2 * x_2 + \dots + t_n * x_n) \quad (7.2)$$

Gdje su  $x_1, x_2, \dots, x_n \in [0,1]$  binarne varijable.

Kad je  $x_i = 1$  poslat ćemo  $i$ -ti brod, a kad je  $x_j = 0$   $j$ -ti brod nećemo poslati. I ovaj je problem jednoznačno određen i izabrati će one brodove koji će najkraće stići, ali tako da ukupno imaju  $\geq$  kapacitet nego volumen mrlje. Ako svi brodovi podjednako brzo skupljaju ulje, operacija će trajati najkraće.



Optimizacijski problem prema brodovima koji najbrže sakupljaju ulje s površine mora

Neka je  $a_1 = 1/b_1, a_2 = 1/b_2, \dots, a_n = 1/b_n$  gdje su  $b_1, b_2, \dots, b_n$  brzina sakupljanja ulja za  $n$  broj brodova izražene u  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Navedeni optimizacijski problem, definiramo kao:

$$\min(f(x)) = \min (a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n) \quad (7.3)$$

Podložno ograničenju (2) gdje su opet varijable:  $x_1, x_2, \dots, x_n \in [0,1]$  binarne varijable.

Iz navedenoga, ako brodovi podjednako brzo dolaze na mjesto onečišćenja, ali se značajno razlikuju po brzini skupljanja ulja, ova će optimizacija dati strategiju koja će najkraće trajati jer će se izabrati brodovi koji će najbrže pokupiti ulje, ali će im ukupan kapacitet biti  $\geq$  kapacitet nego volumen mrlje.



## Strategija koja minimizira ukupno vrijeme sanacije

Navedene prethodne tri strategije su često u kontradikciji. Prva strategija je optimalna za minimiziranje troškova rada koji je funkcija vremena rada, samo u slučaju računanja:

- a) vrijeme dolaska do naftne mrlje,
- b) brzine skupljanja nafte brodova su slične za sve brodove.

U čestim slučajevima kada se ovi parametri značajno razlikuju, strategija možda neće minimizirati trošak rada koji je također funkcija vremena utrošenog na skupljanje nafte i zato što će brodovi koji pristižu brže najvjerojatnije lakše prikupljati ulje uz obalu prema kojoj naftna mrlja putuje. Osim toga, jednom kada stignu na mjesto, brodovi s najvećom brzinom prikupljanja brže će prekinuti operaciju i stoga će vjerojatnije prikupiti onečišćenje blizu obale prije dolaska ulja.

Iz gore navedenih razloga, optimalna strategija može se izračunati tek nakon što se pronađu sve tri strategije. Kada se pronađu sve tri strategije, lako se može izračunati ukupno vrijeme rada brodova za svaku strategiju. Na primjer, u prvoj strategiji ukupno vrijeme operacije,  $T_1$ , (dolazak plus povratak plus preuzimanje) je:

$$T_1 = \sum_{i=1}^m (2 \cdot ta_i + tc_i) \quad (7.4)$$

Gdje je  $ta_i$  vrijeme dolaska  $i$ -tog broda do naftne mrlje, a  $tc_i$  vrijeme potrebno da  $i$ -h brod prikupi naftu. Vrijeme skupljanja  $tc_i \leq$  vremenu potrebnom da brod  $i$  napuni svoj spremnik. Faktor  $2 \cdot ta_i$  je potreban jer  $i$ -tom brodu treba  $ta_i$  vrijeme da se vrati na mjesto pristajanja. Za tri strategije ukupna vremena rada su  $T_1$ ,  $T_2$  i  $T_3$ . Strategija koja minimizira ukupno vrijeme rada brodova je: minimum ukupnog vremena rada =  $\min(T_1, T_2, T_3)$ .

Kod sanacije ulja s površine mora veliku ulogu imaju i kemijski procesi kao što je starenje ulja. Za određivanje procesa starenja ulja poput: isparavanja, stvaranja emulzije te disperzije ulja, koristio se program ADIOS<sup>®</sup>. S pomoću navedenoga programa moguće je odrediti volumen izlivenog ulja kojeg je potrebno sanirati nakon kemijskih reakcija. Prednost ADIOS<sup>®</sup> programa je što s relativno malim brojem ulaznih parametara dobivaju se ključne informacije koje mogu pospješiti brzinu reagiranja na iznenadna onečišćenja izazvana izlivanjem ulja. Baza podataka u ADIOS<sup>®</sup> programu omogućuje informacije o fizičko-kemijskim svojstvima izlivenog ulja što omogućava bolji i sigurniji pristup mjestu onečišćenja. Dobiveni podaci

poput reakcije određenog ulja s drugim supstancama mogu biti od vitalnog značenja za očuvanje prirode i okoliša. Nadalje, ADIOS® program grafički prikazuje svojstva ulja kao što su: isparavanje, disperzija i kretanje ulja po morskoj površini u realnome vremenu. Baze podataka u ADIOS® programu su prikupljene od strane Environment Canada i the U.S. Department of Energy and Industry. Također, s pomoću programa je moguće izraditi modele za procjenu učinkovitosti pojedine metode čišćenja kao što su kemijske metode, mehaničko odstranjivanje ulja ili izgaranje ulja na morskoj površini. Ograničenje programa ADIOS® je što može maksimalno predvidjeti ponašanje ulja unutar pet dana. Nakon pet dana od izljeva, kada se najčešće događaju drugi procesi kao što su biorazgradnja i fotooksidacija s pomoću ADIOS® programa se ne mogu izraditi potrebni modeli. ADIOS® program omogućava rane i pravovremene reakcije koje dovode do sigurnog uklanjanja ulja s morske površine i/ili obala te nadasve očuvanja priobalnog dijela mora.

Konačno, na proizvoljnom primjeru prikazani su procesi starenja vrlo viskoznog ulja te simulacija kretanja i širenja mrlje po površini mora na području Istočne obale Sjedinjenih Američkih Država, s pomoću programa WebGNOME. S pomoću navedenog modela koji je javno dostupan, moguće je modelirati procese starenja raznih ulja kao postojanih tako i nepostojanih ulja. Također, moguće je napraviti simulaciju širenja mrlje po moru uzimajući u obzir visinu valova i brzinu vjetra. WebGNOME je razvijen od strane NOAA (Office of Response and Restoration (OR & R) Emergency Response Division) za upotrebu kod reagiranja na iznenadna onečišćenja mora.

### 3.1. Hijerarhijski model optimizacije

Kako u ovoj disertaciji brodovi predstavljaju varijablu, baviti ćemo se cjelobrojnom optimizacijom. Općenito:  $\min f(X), g(X) \geq h, X \in \{0,1\}^n, h \in R, n \in N$ . U slučaju da su funkcije  $f$  i  $g$  linearne imamo linearnu cjelobrojnu optimizaciju:  $\min (A^T * X), B^T * X \geq h, X \in \{0,1\}^n, A, B \in R^n, h \in R^m, n, m \in N$ .

Minimizacija može dovesti do više optimalnih rješenja  $D = \{X_1^*, \dots, X_r^*\}, r \in N$ . Sva rješenja je potrebno naći kako bi se uz pomoć vanjske funkcije „troška“  $p(X_1^*, \dots, X_r^*)$  mogla pokrenuti daljnja optimizacija problema:  $\min p(X_1^*, \dots, X_r^*)$ . No, i dalje može preostati više optimalnih rješenja.

U slučaju da se minimizira više funkcija cilja, razmatra se multikriterijalna, cjelobrojna linearna optimizacija:  $\min (A_1^T * X; \dots, A_m^T * X), g(X) \geq h \quad X \in \{0,1\}^n, A_i \in \mathbb{R}^n, h \in \mathbb{R}^m, m, n \in \mathbb{N}$ . Pri tom se ne može napisati  $\min (A * X)$  gdje je  $A$  matrica dimenzije  $(m,n)$  jer je riječ o različitim kombinacijama nepoznate varijable  $X$  koje pojedinačno zadovoljavaju uvjete.

Ovdje također postoji više dominantnih rješenja  $D = \{X_{1,1}^*, \dots, X_{1,r1}^*; \dots, X_{n,1}^*, \dots, X_{n,rm}^*\}$  i sva je potrebno naći jer ona definiraju kompletnu Paretovu granicu. Kompletna Paretova granica dominantnih rješenja je potrebna jer se uz definiciju vanjske funkcije troška mogu pronaći svi optimumi. Pri tom za skup optimalnih rješenja,  $O$ , vrijedi:  $O \subseteq D$ .

### 3.1.1. Općeniti hijerarhijski (dinamički) algoritam za kombinatorni problem

Ako se  $A_1, A_2, \dots, A_n$  ne mogu napisati u analitičkom obliku, nužno je algoritmu optimizacije za kombinatorni problem pristupiti dinamično odnosno hijerarhijski uz pomoć sukcesije strategija u obliku drva odlučivanja („decision tree“). Strategija 1: izbor svih kombinacija koje zadovoljavaju  $\text{alg}_1 \min (X)$  uz uvjet  $g_1(X) \leq h_1 \Rightarrow X_{1,1}^*, \dots, X_{1,r1}^*$ . Ovdje  $\text{alg}_1 \min (X_1)$  znači prvu algoritamsku minimizaciju. Strategija 2: izbor iz preostalih kombinacija koje zadovoljavaju  $\text{alg}_2 \min (X)$ , uz uvjet  $g_2(X) \leq h_2 \Rightarrow X_{2,1}^*, \dots, X_{2,r2}^*$  itd. do strategije  $m$ :  $\text{alg}_m \min (X)$  uz uvjet  $g_m(X) \geq h_m \Rightarrow X_{n,1}^* \dots, X_{n,rm}^*$ . Izbor iz kompletne Paretove granice dominantnih rješenja,  $\{D\}$ , se izvodi pomoću minimizacije eksterne funkcije troška ( $p$ ):  $\min p(\{D\})$  ili  $\text{alg}_{m+1} \min p(\{D\})$  uz uvjet  $g_{m+1}(\{D\}) \geq h_{m+1}$ . Za rezultanti skup optimalnih rješenja,  $O$ , također vrijedi:  $O \subseteq D$ .

Zbog usporedbe, koriste se podaci kao u radu (Đorđević i sur. 2022), brzine brodova i protoci pumpi su jednaki za sve brodove pa je provjera rezultata programa (u prilogu) jednostavnija. Neka je volumen onečišćenja, to jest uljne mrlje,  $25 \text{ m}^3$ . Najprije se razmatra slučaj kad se brodovi nalaze na istoj udaljenosti od lokacije onečišćenja (Tablica 1a). U drugom slučaju brodovi se nalaze na različitim udaljenostima od onečišćenja (Tablica 1b). Cijena radnog sata broda je u ovom primjeru uzeta proporcionalno kapacitetu tanka.

Naziv broda	Udaljenost broda od onečišćenja (km)	Brzina plovidbe broda (km/h)	Volumen tanka broda ( $\text{m}^3$ )	Brzina pumpe ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Cijena broda (EUR/h)
-------------	--------------------------------------	------------------------------	--------------------------------------	--	----------------------



Orljava	0	10	10	1	100
Drava	0	10	12	1	120
Sava	0	10	16	1	160
Tuhobić	0	10	20	1	200

Tablica 1a. Podaci o brodovima koji trenutno kreću u sanaciju onečišćenja.

Udaljenost broda od onečišćenja je nula kilometara u tablici 1a. To je iz razloga jer model u ovom pokaznom primjeru uzima da su brodovi već na mjestu onečišćenja.

Naziv broda	Udaljenost broda od onečišćenja (km)	Brzina plovidbe broda (km/h)	Volumen tanka broda (m <sup>3</sup> )	Brzina pumpe (m <sup>3</sup> /h)	Cijena broda (EUR/h)
Orljava	100	10	12	1	100
Drava	150	10	12	1	120
Sava	200	10	16	1	160
Tuhobić	300	10	20	1	200

Tablica 1b. Podaci o brodovima koji se nalaze na različitim udaljenostima od mrlje.

Najprije se za flotu s  $n$  brodova računaju sve moguće kombinacije bez ponavljanja za sve brojeve  $k = 1, n$ . Zatim se za svaku dobivenu kombinaciju računa ukupni kapacitet tankova brodova u pojedinoj kombinaciji. Kombinacije čiji kapacitet je manji od volumena mrlje se odbacuju. Za svaku kombinaciju slijedi optimizacija s obzirom na udaljenost, brzinu, volumni kapacitet i protok pumpe. Kod optimizacije je prvi korak pretprocesiranje na način da se za svaki brod izračuna vrijeme dolaska i odlaska s lokacije onečišćenja. Trenutak dolaska računa se iz podataka o brzini broda i udaljenosti od mrlje, to jest onečišćenja, a trenutak odlaska o protoku pumpe pri čemu se kao početni trenutak akcije uzima istovremeni polazak svih brodova. Vremena dolazaka i odlazaka brodova sortiraju se kronološki, što se može prikazati na vremenskoj liniji. Time je pretprocesiranje završeno i slijedi optimizacijska petlja, u kojoj je broj iteracija jednak broju intervala skupljanja ulja i ovisi o broju svih trenutaka dolazaka odnosno odlazaka umanjeno za 1.

U svakoj iteraciji volumen mrlje  $P$  umanje se za volumen koji su skupili brodovi dostupni u toj interakciji (intervalu). U iteraciji kad je  $P=0$ , akcija završava. Ako se dogodi da je  $P<0$ , računa se korekcija, gdje se vrijeme trajanja intervala reducira ovisno o trenutku kad je  $P=0$ . Nakon završetka akcije računaju se podaci (postprocesiranje) o skupljenom volumenu, trajanju pumpanja (skupljanja mrlje) i plovidbe te obračun troška akcije ovisno o ukupnom broju radnih sati brodova (plovidba + pumpanje). Na koncu se za sve kombinacije formira završna tablica s obzirom na vrijeme akcije i cijenu.

Prema dobivenim podacima bira se optimalna kombinacija. U slučaju da se mrlja ne može sanirati u jednom dolasku, brodovi odlaze u izabranu luku iskrcaja, koja je na određenoj udaljenosti od mrlje i vraćaju se. Minimalan broj potrebnih odlazaka u luku se može odrediti u pretpocesiranju, a sam postupak je zatim isti kao i za jedan odlazak u luku.

## 4. REZULTATI

a) Optimizacija uz najmanji zbroj kapaciteta brodova koji je veći od volumena izljeva ulja (NZKB): U ovom primjeru flota se sastoji od 4 broda (Tablica 1), što daje ukupno 16 mogućih kombinacija odnosno strategija. S obzirom na volumen mrlje  $P=25 \text{ m}^3$ , u samo 10 strategija brodovi u jednom dolasku mogu sanirati mrlju (Tablica 2). Gledamo svih 10 strategija (scenarija) umjesto samo onih koje se odnose na minimalni broj brodova iz razloga jer konačna brzina završetka akcije ne ovisi samo o broju brodova, nego i protoku pumpi i kapacitetu tankova. Također, ovisno o cijeni sata rada različitih brodova, manji broj brodova ne znači nužno jeftiniju akciju. Ako se na to doda i različita početna udaljenost brodova od mrlje, problem postaje još kompleksniji jer brodovi pristižu u različito vrijeme.

Scenarij / naziv broda	1	2	3	4
1	1	0	1	0
2	1	0	0	1
3	0	1	1	0
4	0	1	0	1
5	0	0	1	1
6	1	1	1	0
7	1	1	0	1
8	1	0	1	1
9	0	1	1	1
10	1	1	1	1

Tablica 2. Brodovi dostupni u strategijama gdje je kapacitet tankova flote dovoljan za skupljanje mrlje.

b) Optimizacija brodova koji najbrže skupljaju ulje uz najmanji zbroj kapaciteta brodova pod uvjetom najmanjeg troška

Brodovi se nalaze na lokaciji mrlje i istovremeno počinju skupljati ulje (nema plovidbe). Lako se može provjeriti da je za svaku strategiju suma sakupljanje mrlje  $25 \text{ m}^3$  (Tablica 3). Ovdje je dobiven rezultat s obzirom na kapacitete tankova te je trajanje akcije 12.5 sati. Budući da je protok pumpe  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  onda vrijeme skupljanja ulja za svaki scenarij odgovara jednakom usisanom volumenu. Budući da su u ovom slučaju brodovi bili na lokaciji onečišćenja, akcija

je krenula trenutno i ukupno trajanje akcije za pojedinu strategiju jednako je maksimalnom trajanju pumpanja (Tablica 4).

Scenarij / naziv broda	1	2	3	4
1	10.00	0.00	15.00	0.00
2	10.00	0.00	0.00	15.00
3	0.00	12.00	13.00	0.00
4	0.00	12.00	0.00	13.00
5	0.00	0.00	12.50	12.50
6	8.33	8.33	8.33	0.00
7	8.33	8.33	0.00	8.33
8	8.33	0.00	8.33	8.33
9	0.00	8.33	8.33	8.33
10	6.25	6.25	6.25	6.25

Tablica 3. Volumen ulja kojeg skupi svaki brod (suma je 25 m<sup>3</sup> za svaki scenarij).

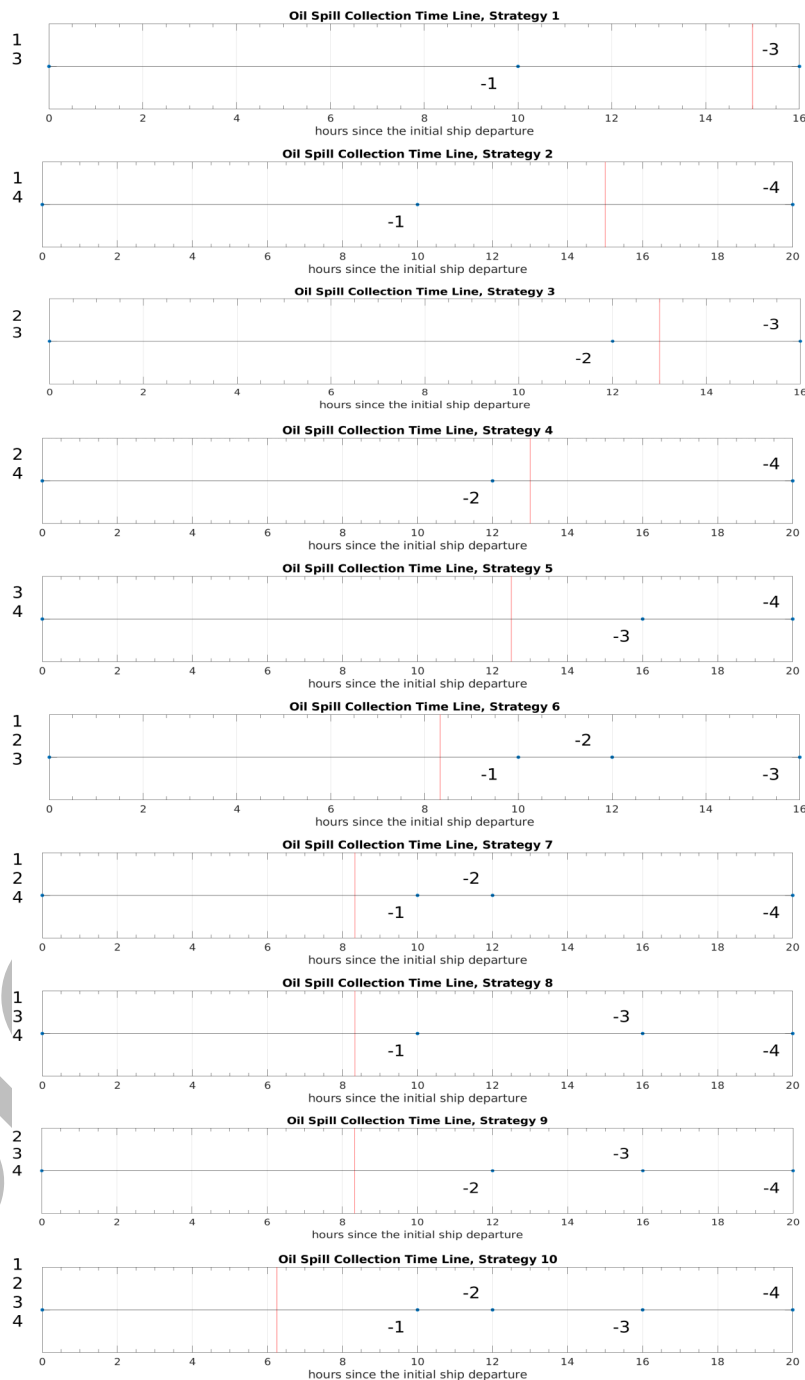
Ovdje se vidi da optimalno rješenje nije ono s najmanjim brojem brodova. Za Strategiju 1, u kojoj sudjeluju 2 broda, trajanje akcije je 15 sati, a ako se koriste sva 4 broda (Strategija 10), trajanje je samo 6.25 sati. Pri tome je cijena Strategije 10 samo 225 eura veća od Strategije 1. Strategija 6 je najjeftinija, a vrijeme sanacije je oko 2 sata dulje od najkraćeg, onog u Strategiji 10.

Scenarij / naziv broda	1	2	3	4	Vrijeme (h)	Cijena (EUR)
1	10.00	0.00	15.00	0.00	15.00	3.400
2	10.00	0.00	0.00	15.00	15.00	4000
3	0.00	12.00	13.00	0.00	13.00	3520
4	0.00	12.00	0.00	13.00	13.00	4040
5	0.00	0.00	12.50	12.00	12.50	4500
6	8.33	8.33	8.33	0.00	8.33	3167

7	8.33	8.33	0.00	8.33	8.33	3500
8	8.33	0.00	8.33	8.33	8.33	3833
9	0.00	8.33	8.33	8.33	8.33	400
10	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	3625

Tablica 4. Trajanje skupljanja mrlje za svaki brod i ukupno vrijeme akcije (plovidba + pumpanje) te trošak za svaku strategiju.

Ocjena rada  
u tijeku



Slika 17. Vremenske linije dolazaka i odlazaka brodova u kronološkom slijedu za slučaj kad nema plovidbe.

Prema tome, konačna optimizacija trebala bi se bazirati na parametrima cijene i vremena trajanja akcije, a ne na broju brodova. Isti omjeri cijena i vremena akcije bili bi u slučaju da svi brodovi dolaze s jednakih udaljenosti. Na slici 17. nalazi se vremenska linija kronološkog slijeda akcije saniranja za sve strategije. U ovom idealiziranom slučaju bez plovidbe, akcija

pumpanja kreće u nultom trenutku. Vrijeme završetka akcije se odnosi na trenutak kad je cijela mrlja sanirana ( $P = 0 \text{ m}^3$ ). Vrijeme tog trenutka ovisi o kapacitetu tankova, protoku pumpe i kombinacije brodova koji su prisutni u pojedinoj strategiji.

c) Optimizacija brodova koji najbrže pristižu na mjesto akcidenta uz najmanji zbroj kapaciteta brodova pod uvjetom najmanjeg troška.

U ovom primjeru izabrani brodovi s istim specifikacijama kao u prethodnom primjeru isplavljavaju u isti tren, ali se nalaze na raznim udaljenostima od lokacije mrlje.

Scenarij / naziv broda	1	2	3	4
1	10.00	0.00	15.00	0.00
2	10.00	0.00	0.00	15.00
3	0.00	12.00	13.00	0.00
4	0.00	12.00	0.00	13.00
5	0.00	0.00	0.00	9.00
6	10.00	10.00	5.00	0.00
7	10.00	12.00	0.00	3.00
8	10.00	0.00	12.50	2.50
9	0.00	12.00	11.50	1.50
10	10.00	10.00	5.00	0.00

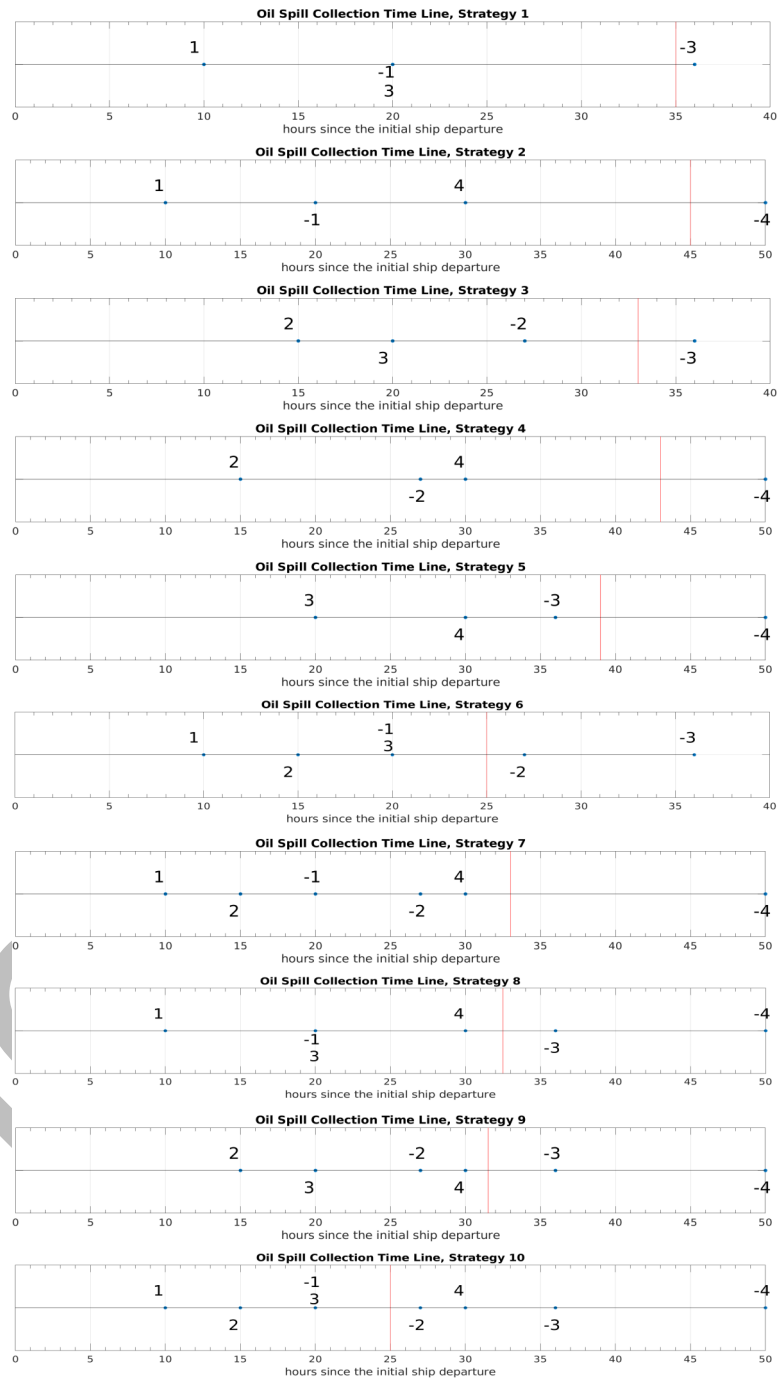
Tablica 5. Volumen mrlje koju skupi svaki brod (suma je  $25 \text{ m}^3$  za svaki scenarij).

Scenarij / naziv broda	1	2	3	4	Vrijeme (h)	Cijena (EUR)
1	10.00	0.00	15.00	0.00	35.00	7600
2	10.00	0.00	0.00	15.00	45.00	11000
3	0.00	12.00	13.00	0.00	33.00	8520
4	0.00	12.00	0.00	13.00	43.00	11840
5	0.00	0.00	16.00	9.00	39.00	13560
6	10.00	10.00	5.00	0.00	25.00	9000
7	10.00	12.00	0.00	3.00	33.00	11840
8	0.00	0.00	12.50	2.50	32.50	13700
9	12.00	12.00	11.50	1.50	31.50	14580
10	10.00	10.00	5.00	0.00	25.00	9000

Tablica 6. Trajanje skupljanja mrlje za svaki brod i ukupno vrijeme akcije (plovidba + pumpanje) te trošak za svaku strategiju.

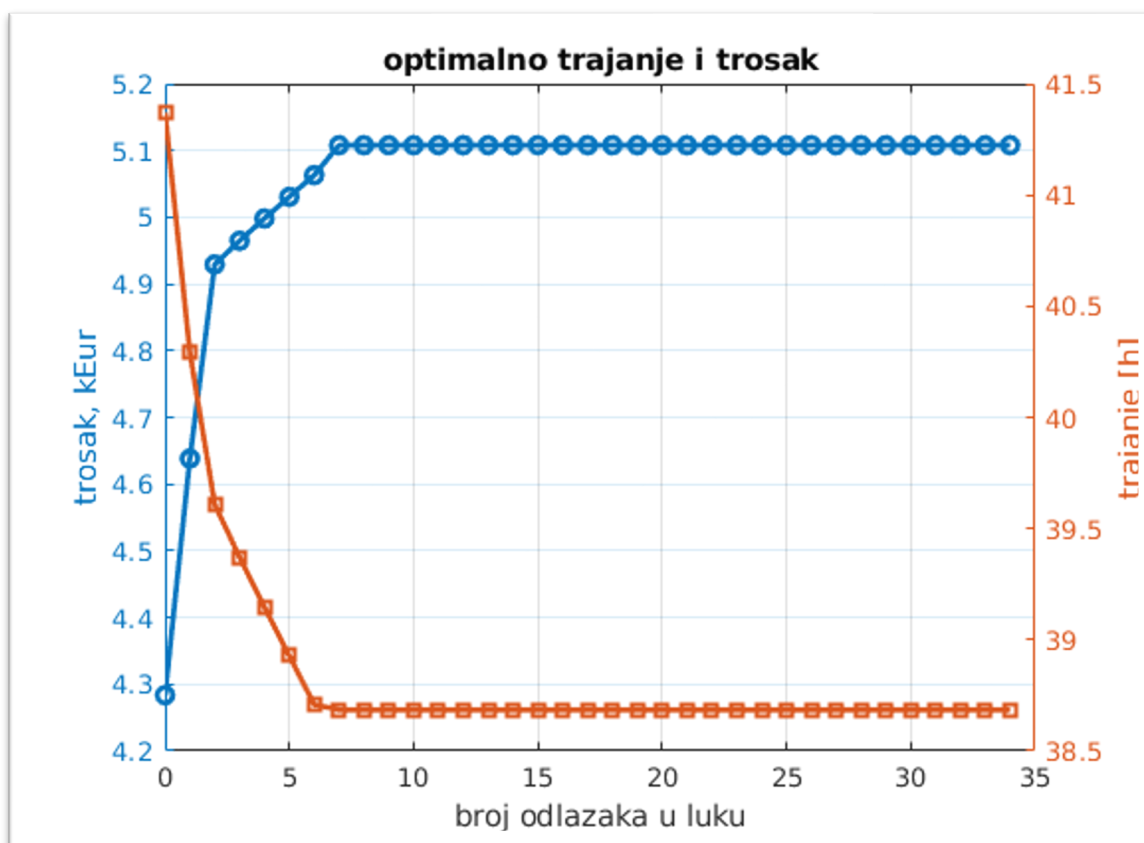
Ovakav početni raspored brodova utječe na to da je volumen koji će svaki brod pokupiti (Tablica 5.) drukčiji od onog u prethodnom primjeru kad nije bilo plovidbe (ili su svi brodovi krenuli s iste udaljenosti istom brzinom i u isti tren). U primjeru Strategije 10 kad se koriste svi brodovi, prva 3 broda će skupiti cijelu mrlju prije nego 4. brod doplovi na lokaciju mrlje. Zato on nije ni potreban u ovoj strategiji te je isključen iz nje. Ova situacija može se jasnije vidjeti i na slici 18.





Slika 18. Vremenske linije dolazaka i odlazaka brodova u kronološkom slijedu za slučaj kad brodovi započinju plovidbu s raznih pozicija.

U konačnici, zavisno o broju brodova, njihovim tehničkim karakteristikama, šaljem li brod na iskrcaj prikupljenog ulja u obližnju luku ili brod prihvata, a zatim nazad na sanaciju ulja, te zaključno ukupni račun troškova vidljivi su na slici 19.:



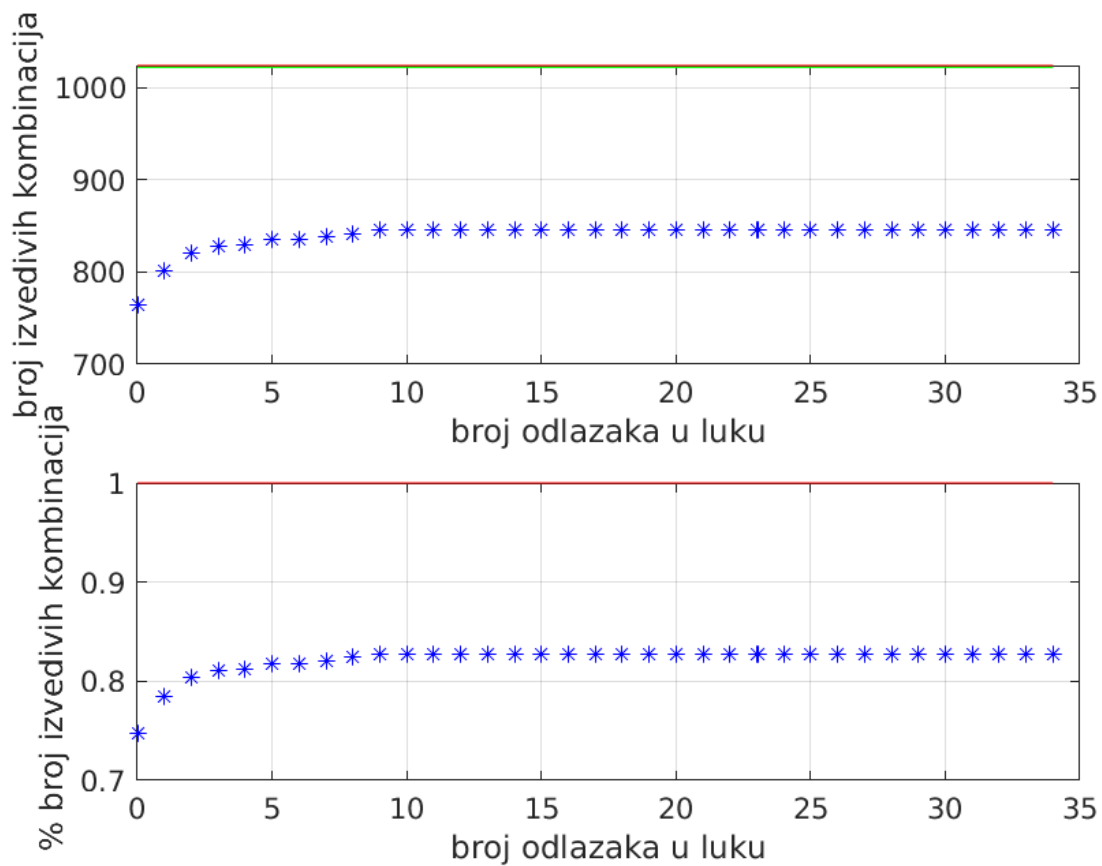
Slika 19. Prikaz najkraćeg vremena sanacije uz troškove.

Slika 19. prikazuje četiri glavne stavke:

- 1\_ukupni broj odlazaka u luku,
- 2\_ukupan trošak pojedinog broda,
- 3\_ukupno trajanje prikupljanja onečišćenja s ukupnim troškovima,
- 4\_optimalno trajanje uz ukupni trošak sanacije.

Četvrta stavka, vezana za optimalno trajanje i troškove je na koncu zavisna od scenarija do scenarija. U određenim scenarijima iznenadnog onečišćenja, ako ulje znatno ne prijete okolišu, to jest osjetljivom resursu, možemo poslati manji broj brodova u akciju, čime ćemo produžiti vrijeme uklanjanja onečišćenja, ali ćemo smanjiti troškove. Prema tome, predstavljeni problem nema nužno jedinstveno optimalno rješenje, nego je vezano uz vrstu onečišćenja, mjesto nastanka onečišćenja te naposljetku odluci o zapovjedniku cijele operacije. Model služi kao prijedlog odnosno pomoć pri donošenju spomenutih odluka.

Na kraju, slika 20. prikazuje konvergenciju, odnosno prikazuje približavanja niza objekata, to jest varijable od interesa koje su se uzele u obzir prilikom optimiziranja:

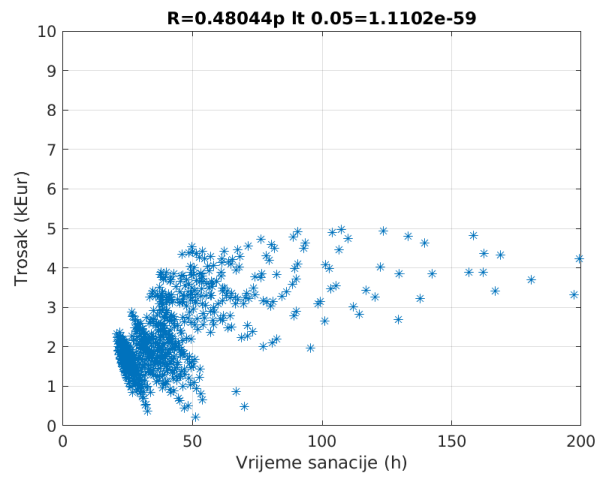
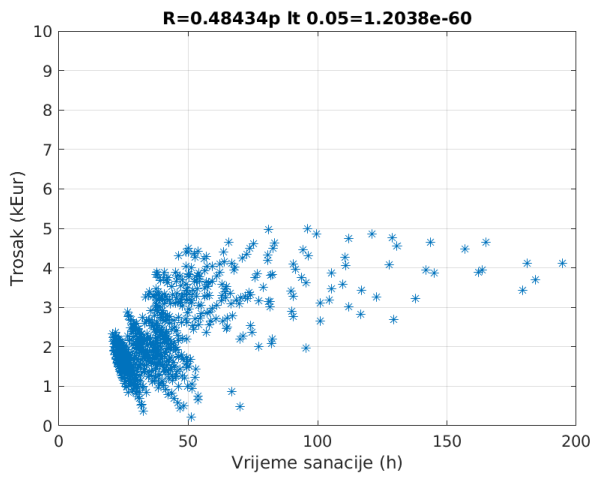
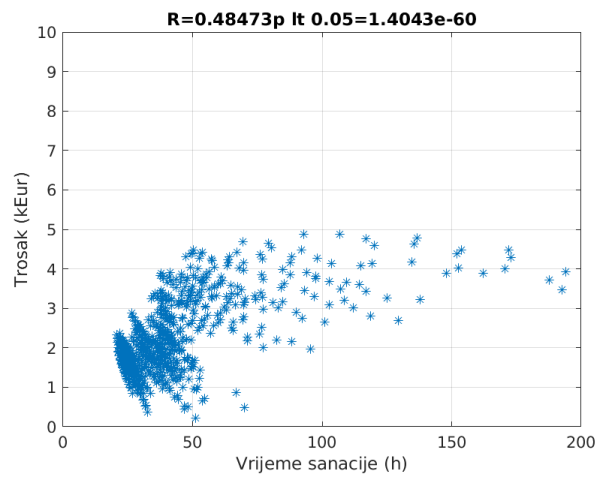
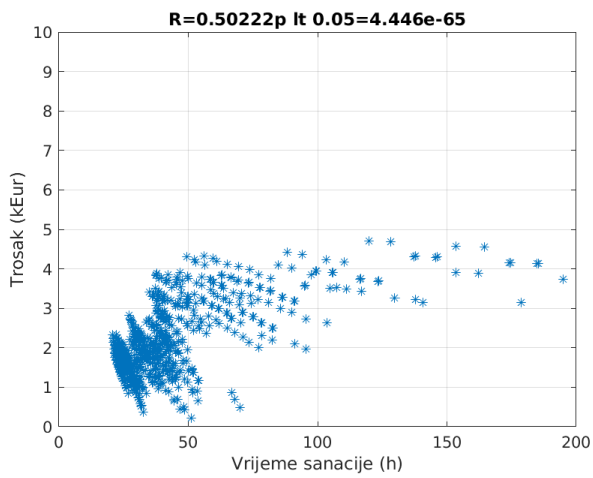
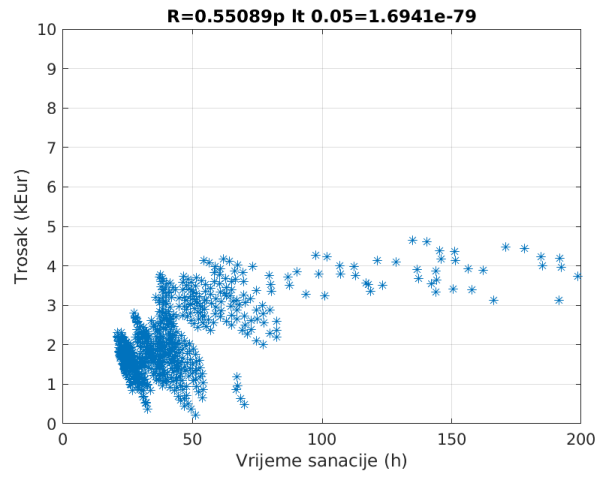
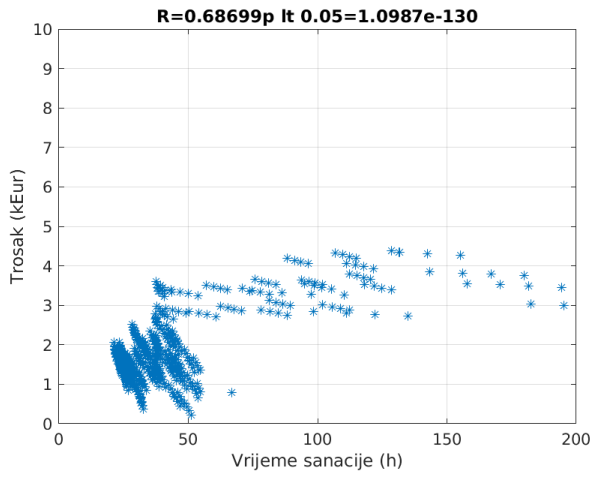


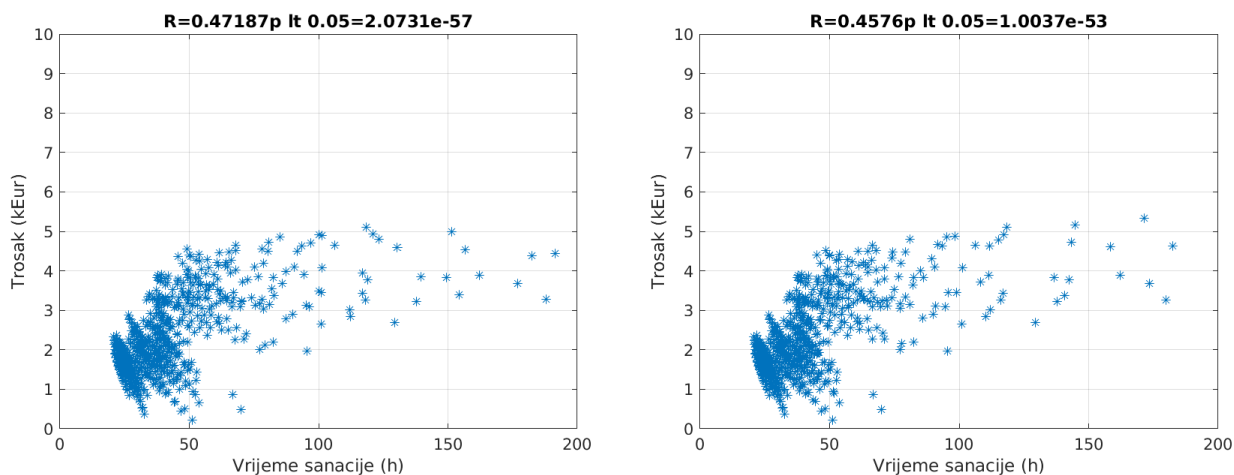
Slika 20. Prikaz konvergencije.

Na slici 20. vidljive su konvergencije za sljedeće parametre:

- ukupan broj odlazaka brodova u luku iskrcaja nakon prikupljenog ulja i vraćanje na mjesto onečišćenja,
- broj izvedenih kombinacija.

Navedeni parametri se mogu prikazati i na sljedeći način:








Slika 21. Prikaz ukupnih kombinacija.

Slika 21. prikazuje:

- ⇒ ukupan broj kombinacija u ovom slučaju za deset specijaliziranih brodova,
- ⇒ vrijeme trajanja sanacije izraženo u satima,
- ⇒ ukupni trošak koji je izračunat po satu za pojedini brod.

U konačnici, s pomoću prikazanih rezultata, odluka intervencije vezana za predstavljeni problem se temelji na tri glavna kriterija:

-  udaljenost onečišćenja od osjetljivog ekološkog resursa,
-  ukupno vrijeme sanacije,
-  ukupni trošak sanacije.

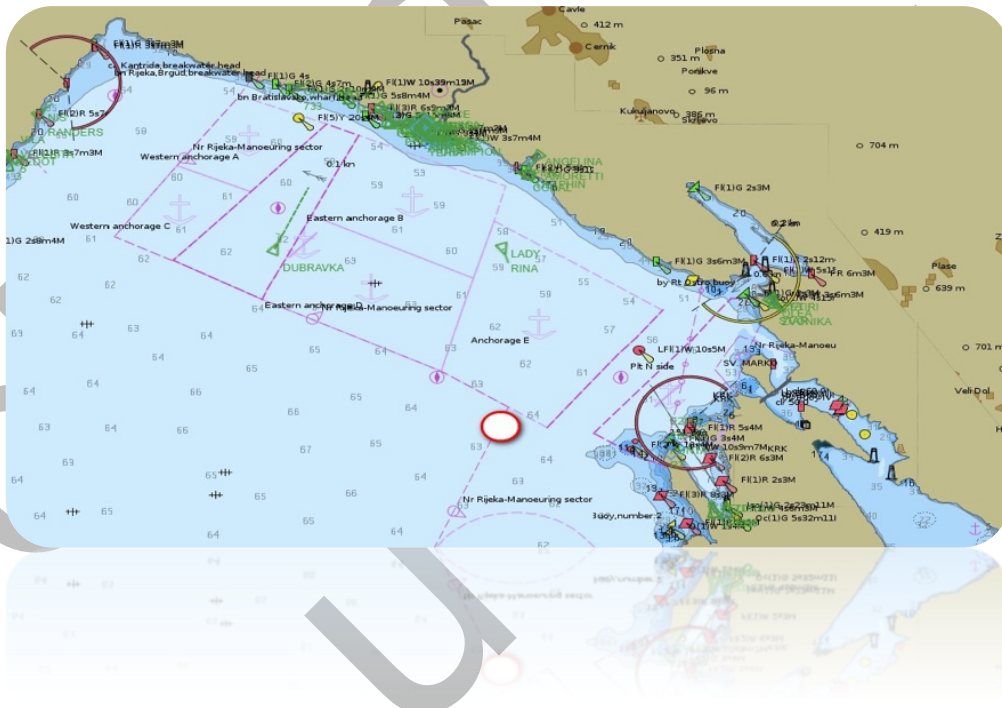
U poglavlju 4.3. su predstavljeni rezultati vezani za kemijske procese i način na koji mogu utjecati na donošenje odluke vezane za reagiranje na iznenadno onečišćenje mora s brodova.

#### 4.1. Analitičko eksperimentalni dio pomoću ADIOS® programa

U ovom poglavlju je prikazan jedan od mogućih scenarija iznenadnog onečišćenja mora s uljima na području Omišaljškoga zaljeva. S pomoću specijaliziranog programa pod nazivom ADIOS® uvršteno je ulje s određenim karakteristikama. Scenarij za izljev ulja na području Omišaljškog zaljeva:

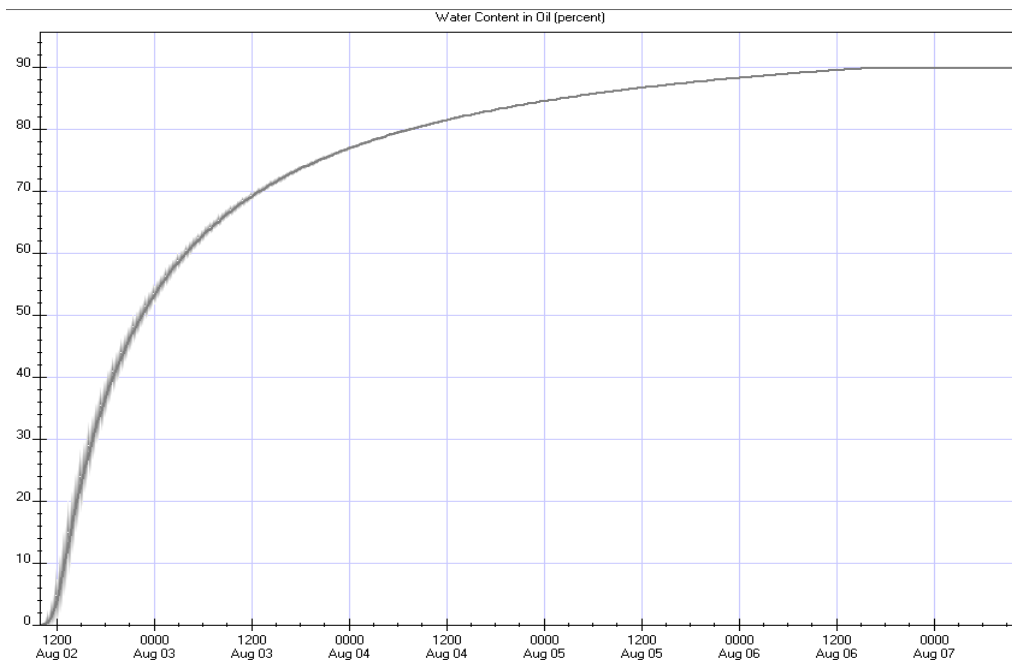
- pozicija onečišćenja: 45° 14' N; 014° 29' E;

- vrsta pomorske nezgode: sudar između dva broda koji je rezultirao oštećenjem trupa kod jednog broda te curenja nafte iz tankova;
- nema ljudskih žrtava;
- vidljivost: 12 NM;
- naziv ulja koje je izliveno u more: Arabian Extra Light, Aramco;
- vrsta ulja: sirova nafta;
- API: 37,0;
- brzina vjetra iznosi: 7 ČV;
- temperatura mora: 21 °C;
- morske struje: 0,78 ČV;
- vrijeme curenja ulja u more: 02. kolovoza u 10:00 h;
- količina izlivenog ulja: 260 m<sup>3</sup>.



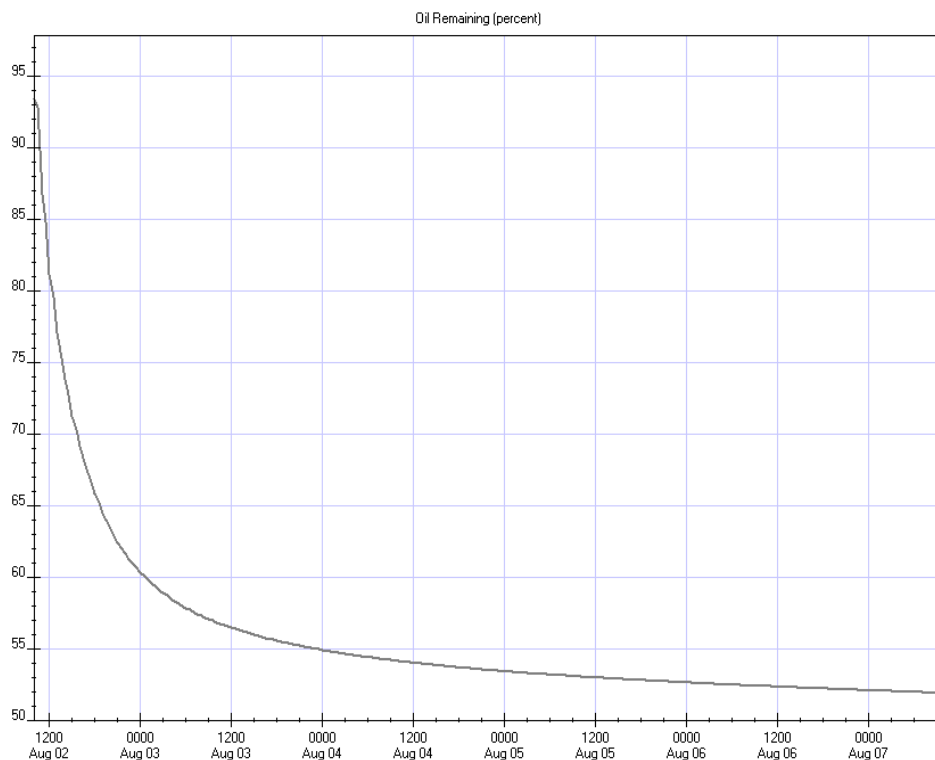
Slika 22. Kvarnerski zaljev – Digitalni prikaz pozicije mogućeg onečišćenja.

U slučaju onečišćenja s uljem na području Kvarnerskog zaljeva područje je bogato plažama i uvalama koje su od bitnog ekološkog i gospodarskog značenja za turizam cijele Hrvatske. U nastavku slijede grafički prikazana svojstva ulja *Arabian Extra Light, Aramco* dobivena *ADIOS*<sup>®</sup> specijaliziranim programom s pomoću gore zadanih varijabli.



Slika 23. Analitički prikaz promjene sastava emulzije s vremenom.

Emulgiranje je izraz koji se obično koristi za stvaranje emulzije vode u ulju. Emulzija koja nastaje uobičajeno se naziva čokoladna pjenica. Sadržaj vode u emulziji može biti do 90 %. Emulgiranje ulja povećava ukupni volumen materijala u ovom slučaju ulja te dodatno otežava čišćenje s morske površine. Operativno osoblje na taj način mora upotrijebiti veće vlastite napore i mehanizaciju za odstranjivanje takvog ulja koje dodatno podiže troškove. Zbog emulzije ulja viskoznost drastično raste (Umar i sur. 2018).

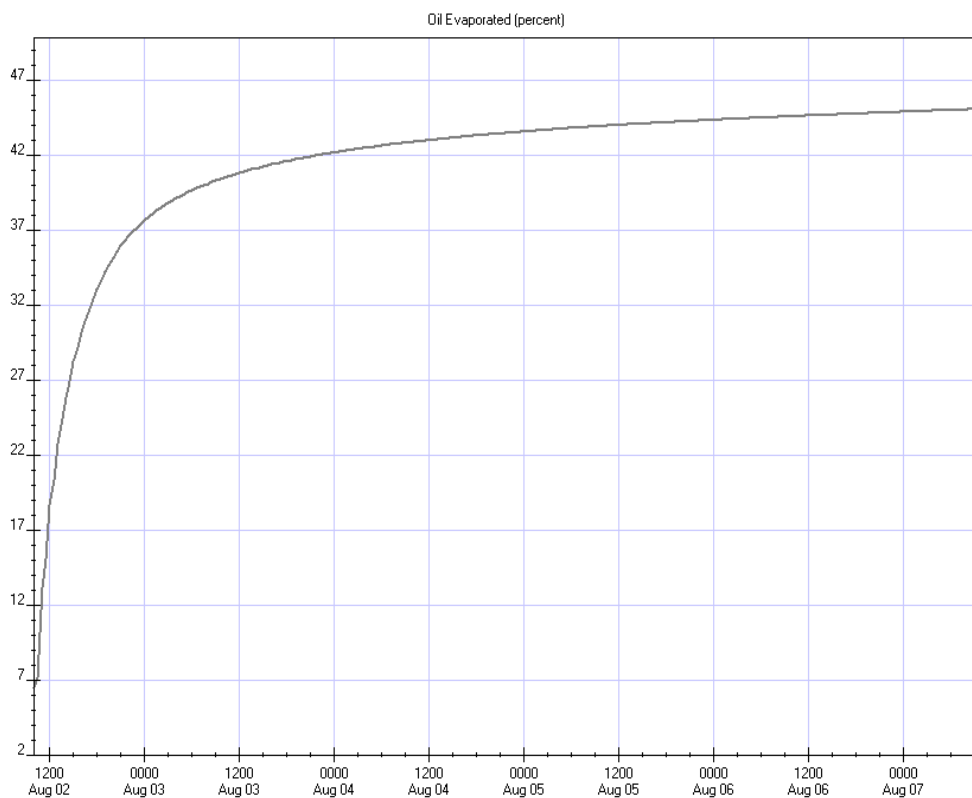


Slika 24. Analitički prikaz promjene količine ulja preostalog nakon isparavanja s vremenom.

Kod lako hlapljivih ugljikovodika koji su prisutni u atmosferi u niskim koncentracijama postoji podložnost raznim antropogenim utjecajima. Nadalje, navedeno antropogeno djelovanje utječe na prirodnu ravnotežu te tako i na koncentraciju ugljikovodika u zraku (Kovač-Andrić i sur. 2013).

Na slici 24. je vidljiv ostatak ulja na morskoj površini u razmaku vremena nakon isparavanja i otapanja. Na području Riječkog zaljeva, u blizini privezišta za manje brodice, najčešće dolazi do onečišćenja s ne-postojanim uljem. U slučajevima onečišćenja mora s takvom vrstom ulja, ulje gotovo potpuno evaporira, odnosno lakše čestice se gube u atmosferi. Iz navedenog razloga prilikom malih izljeva intervencija na iznenadna onečišćenja mora nije potrebna, nego se vrši samo nadzor toga ulja. Na slici 24. vidi se da ulje nije isparilo do kraja te da se zadržalo na morskoj površini u ovom slučaju na području Omišaljskoga zaljeva. Intervencija je potrebna te brza reakcija i brzo prikupljanje ulja s morske površine može biti od ključnog značenja.

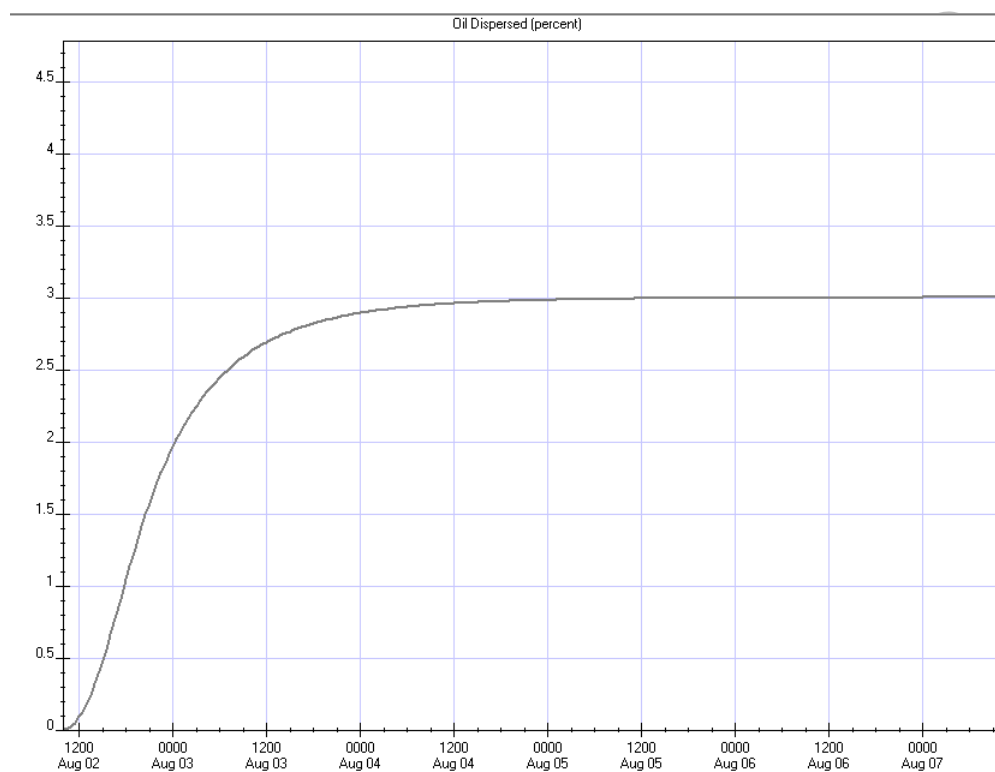




Slika 25. Analitički prikaz promjene količine isparenog ulja s vremenom.

Isparavanje ili evaporacija se događa unutar nekoliko sati od izlivanja ulja na morsku površinu. Hlapljive frakcije ulja se gube u atmosferi. Brzinu isparavanja ili evaporacije ulja određuje vrsta izlivenog ulja, brzina i jačina vjetrova i temperatura okoliša. Uzburkano more pospješuje isparavanje. Ostatak ulja koji ostane na morskoj površini ima veću gustoću i viskozniji je. Većina sirovih nafti isparavanjem gubi do 40 % volumena. Teška pogonska goriva, odnosno bunker na brodovima, pokazuju male gubitke isparavanjem, dok lagani rafinirani proizvodi poput benzina, laganog dizela i kerozina potpuno isparava. Stoga najčešće akcija čišćenja nije ni potrebna nego je samo nužno promatranje ulja kako ne bi došlo do miješanja s još nekim materijalom te tako ugrozilo i onečistilo Kvarnerski zaljev. Gubici zbog otapanja su relativno mali jer je većina ugljikovodika iz mineralnog ulja, to jest nafte, slabo topiva u morskoj vodi. Najtopivije komponente istovremeno su i najhlapljivije. Bitno je istaknuti važnost evaporacije nepostojanog ulja (benzin, dizel, kerozin) u prvih nekoliko sati nakon izljeva (Brdarić i sur. 2019). Lake i hlapljive čestice, primjerice kod benzina, mogu izazvati požar u prvih nekoliko sati nakon izljeva ulja na površinu mora. Nadalje, isparavanje ulja može dovesti do vrtoglavice kod operativnog osoblja, u scenarijima kad se osobna zaštita ne koristi ili se krivo koristi (Reijnhart i Rose, 1982). Prema tome, na slici 26. vidljivo je

isparavanje koje pokazuje upravo trenutak kada je isparavanja najveće i vrijeme kada je vjerojatnost nastanka navedenih nuspojava najveća.



Slika 26. Analitički prikaz promjene disperzije ulja s vremenom.

Disperzija je vrlo važna komponenta koju je potrebno dobro razumjeti i analizirati kako bi čišćenje zahvaćenog područja bilo što učinkovitije. Valovi i turbulencija razbijaju ulje u kapljice. Manje kapljice ostaju u suspenziji, dok se veće kapljice ponovno dižu na površinu mora. Brzina same disperzije ovisi o vrsti ulja koje je izliveno na morsku površinu i stanju mora na kojem se ulje kreće. Brzina prirodne disperzije može se povećati apliciranjem kemijskih disperzanata na izliveno ulje. Primjena kemijskih metoda, ima određeni vremenski interval primjene. Isto tako, bitno je naglasiti da kod primjene navedene metode, može doći do taloženja težih čestica ulja odnosno, teže frakcije ulja tonu na bentos u morima niskog saliniteta ili u slatkoj vodi (Delvigne i Sweeney, 1988). Velika većina prirodnih procesa koja se tiču taloženja jesu međudjelovanja na međupovršini organsko/anorgansko (Dutour Sikirić i sur. 2010).







Većina sirovih nafte ne tone u moru. Inkorporiranje suspendiranih krutih čestica u takozvanom izvjetrenom ulju potpomaže potapanje ulja. Temperatura može utjecati na uzgon samoga ulja na morskoj površini.

Na pješčanim plažama, primjerice na otoku Krku, ulje može akumulirati velike količine pijeska. Na kraju, važno je spomenuti biološku razgradnju samoga ulja. Biološka razgradnja se događa redovito. Brojne bakterije, gljivice i kvasci prisutni u morskom okolišu mogu biološki razgraditi ugljikovodike. Brzina ovisi o temperaturi, prisutnosti hranjivih tvari i vrsti razlivenog ulja. Lakše frakcije u uljima se brže biološki razgrađuju, tako da mikroorganizmi djeluju na granici između ulja i vode. Nadalje, valovi pospješuju disperziju ulja, tako što ulje disperzira u kapljice. Navedeno dovodi do biološke razgradnje razlivenog ulja (Wang i Ben, 2020). Za predviđanje ponašanja i kretanje uljne mrlje po površini mora potrebno je poznavanje osnovnih fizičkih i kemijskih svojstava ulja jer se tako olakša donošenje odluka o operacijama same intervencije. Ako svojstva ulja nisu poznata, potrebno je uzeti uzorak i analizirati ga kako bi se dobile karakteristike ulja i po tome znalo postupati dalje na reagiranje na iznenadna onečišćenja mora od ulja i drugih opasnih i štetnih tvari.

#### 4.2. Simulacija onečišćenja mora

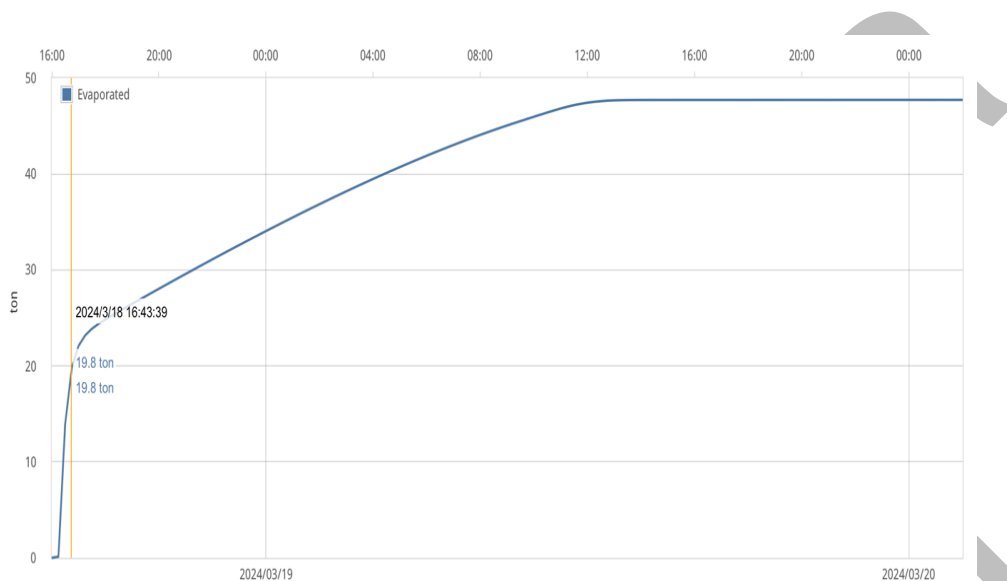
Primjer starenja postojanog ulja na području istočne obale Sjedinjenih Američkih Država.

Karakteristike izlivenog ulja:

-  naziv ulja: viskozno pogonsko gorivo (High Viscosity Fuel Oil),
-  API: 8.5,
-  snaga vjetra: konstantno puhanje jačine od 11 čvorova,
-  visina valova: automatsko računanje s obzirom na snagu vjetra,
-  temperatura mora: 21 °C,
-  količina izlivenog ulja: 500 tona.

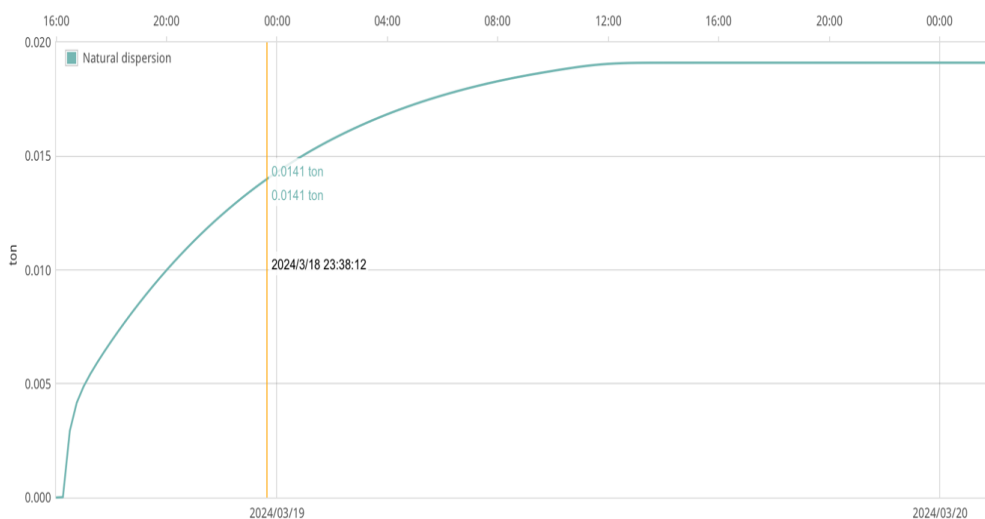
Pravovremene informacije vezane za ukupnu količinu izlivenog ulja, isparavanje, disperziju ulja, sedimentaciju i količinu ulja koja ostaje na površini mora, su ključne kod odabira specijalizirane opreme na reagiranja na iznenadna onečišćenja u priobalnim akvatorijima. Treba naglasiti kako je u praksi u prvih nekoliko sati izvor onečišćenja često nepoznat kao i vrsta i količina izlivenog ulja. U slučaju onečišćenja s brodova, u praksi se odmah zna vrsta i količina onečišćenja koja je dospjela u more. U većim europskim i svjetskim lukama, koriste se razne tehnologije nadzora onečišćenja poput SAR-a, koji omogućavaju rano otkrivanje uljnog onečišćenja. Navedena metoda potpomaže bržom reagiranju na iznenadno onečišćenje,

naročito u akvatorijima gdje su luke u neposrednoj blizini obale (Anagha i sur. 2022). Za zadani primjer slijede informacije vezane za procese starenja za viskozno pogonsko gorivo.



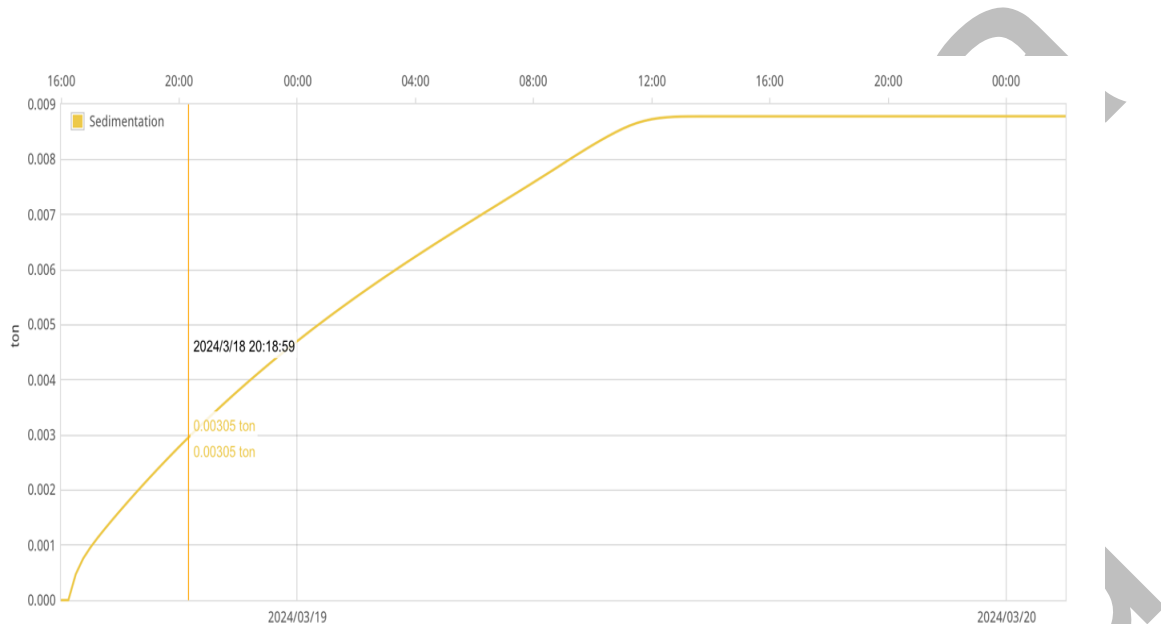
Slika 27. Količina isparenog ulja tijekom 32 sata.

Na slici 27. je prikazan fenomen isparavanja odnosno evaporiranja ulja. Na osi  $x$  se nalazi vrijeme u okviru od 32 sata tijekom 19. 3 i 20. 2024., dok na  $y$  osi imamo količinu ulja koja isparava u navedenom vremenskom intervalu.



Slika 28. Promjena količine dispergiranog ulja tijekom 32 sata.

Na slici 28. je prikazana disperzija ulja na morskoj površini. Os  $x$  je ista kao i na prethodnoj slici, dok os  $y$  prikazuje ukupnu količinu disperziranog ulja u vodeni stupac u vremenskom intervalu od 32 sata.

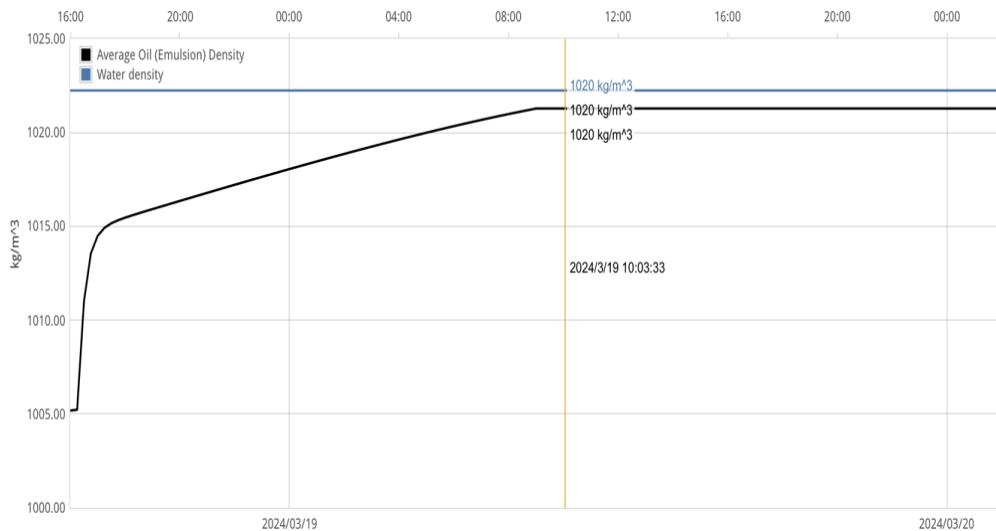


Slika 29. Sedimentacija viskoznog ulja tijekom 32 sata.

Slika 29. prikazuje sedimentaciju viskoznog ulja tijekom 32 sata. Brzina sedimentacije ulja se može izračunati pomoću sljedeće formule (Feng i sur. 2012):

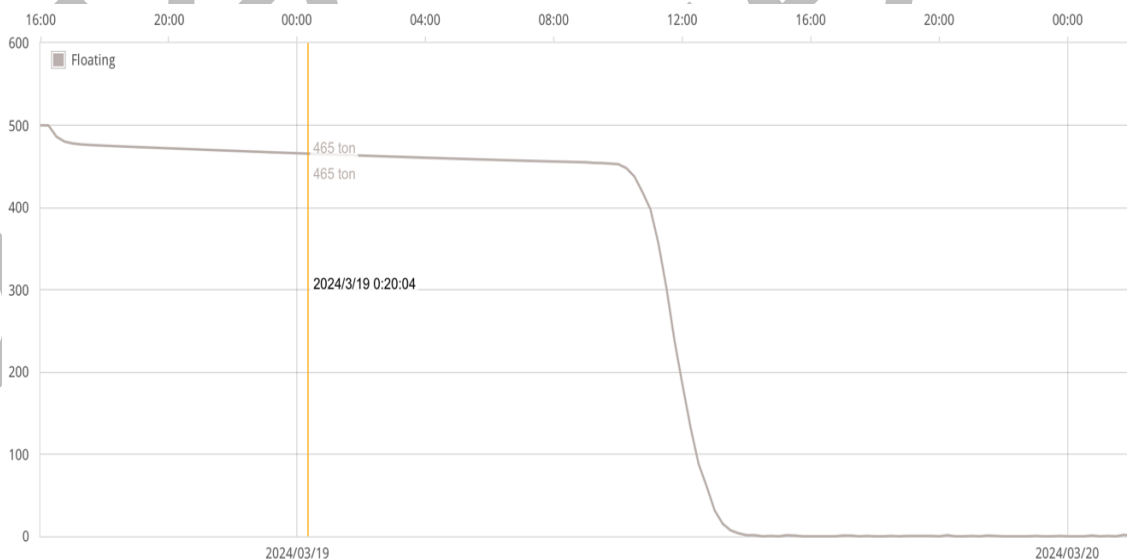
$$w = d^2 g (\rho_s - \rho_1) / 18 \mu \quad (8)$$

gdje je  $w$  je brzina prirodne sedimentacije  $\left[\frac{m}{s}\right]$ , sfernih čestica;  $d$  je promjer čvrste čestice  $[m]$ ;  $\rho_s$  je gustoća čvrste čestice  $[kg/m^3]$ ,  $\rho_1$  je gustoća tekućine  $[kg/m^3]$ , a  $g$  je ubrzanje gravitacije  $[m/s^2]$ .



Slika 30. Prikaz gustoće morske vode i promjene prosječne gustoće uljne emulzije tijekom 32 sata.

Na osi  $x$  se nalazi vrijeme od 32 sata, dok na osi  $y$  imamo gustoću morske vode i gustoću emulgiranog ulja. Gustoća je je od velike važnosti jer razliveno će ulje koje ima veću gustoću od morske vode, to jest veću od  $1020$  do  $1030 \text{ kg/m}^3$ , potonuti će na dno pa nema razloga slati namjenske brodove za reagiranje na onečišćenje jer neće imati što pokupiti.



Slika 31. Promjena količine ulja koja pluta na površini mora tijekom 32 sata.

Slika 31. prikazuje količinu ulja koja pluta na površini mora tijekom 32 sata. Vidljivo je kako će zbog utjecaja meteoroloških i oceanografskih parametara ulje potpuno dispergirati i ispariti,

odnosno nestati s površine mora. Tako će primjerice, nakon dvadeset i jedan sat ukupna količina ulja biti 6,3 % od ukupne količine izlivenog ulja, u ovom slučaju 500 tona, dok će za dvadeset i četiri sata ostati 0 % ulja na površini mora. Ipak, to ne znači da nije potrebna intervencija sanacije razlivenog ulja jer se ulje kako je već objašnjeno u ranijim poglavljima zbog raznih fenomena giba po površini mora te može doći do doticaja s obalom i/ili nekim važnim ekološkim resursom. Iz navedenoga može se zaključiti da ako se navedeno ulje u navedenim uvjetima i svojstvima razlije na otvorenom moru, ono će zasigurno potonuti s mogućom posljedicom štetnih utjecaja za pridnenu floru i faunu. No, kada je riječ o priobalnom dijelovima, zatvorenim ili poluzatvorenim akvatorijima, ulje će najčešće doći do obale unutar 24 h te ga je potrebno sanirati što prije zbog smanjivanja ugroze za ekosustave te manje troškove sanacije.

## 5. RASPRAVA

Kao odgovor na iznenadno onečišćenje zaljeva i uvala u obzir se uzimaju sljedeće varijable od interesa u prikazanom hijerarhijskom modelu: broj raspoloživih brodova za reagiranje na iznenadna onečišćenja mora, brzina skupljanja ulja pojedinog skimmer uređaja koji je ugrađen na brod, volumen tanka na brodovima, udaljenost i brzina plovidbe pojedinog broda do mjesta onečišćenja, trošak broda koji se u modelu računa po operativnom satu svakog broda. Modelom se računa koliko će svaki pojedini brod sakupiti ulja iz mora i hoće li akcija sanacija biti završena u jednom slanju brodova ili će pojedini brod morati otići na iskrcaj sakupljenog ulja te se vratiti u prikupljanje preostalog volumena ulja. Broj raspoloživih brodova ovisi o području onečišćenja, odnosno državi koja ima jurisdikciju na tom onečišćenom području. Treba istaknuti kako model u prezentiranom primjeru pretpostavlja kod svih brodova jednaku brzinu sakupljanja ulja, to jest da je svaki brod opremljen istim skimmer uređajem. U praksi su brodovi nerijetko opremljeni različitim skimmer uređajima. U disertaciji se zbog lakšeg prezentiranja rezultata uzeo primjer jednake brzine sakupljanja, no model je sastavljen za bilo koju brzinu sakupljanja ulja kao i bilo koju pozitivnu vrijednost za ostale parametare. Potrebno je samo u ulaznoj tablici promijeniti broj te pokrenuti program kako bi se dobili rezultati za tražene parametre.

Točnost modela može ovisiti o broju kubika ulja koji pojedini brod može ukrcati. Naime, svaki skimmer je baždaren te su podaci uzeti od proizvođača. No, testiranje skimmer uređaja se vrši u kontroliranim uvjetima, stoga u prirodi može doći do većeg sakupljanja morske vode zajedno s uljem što može dovesti do toga da brod volumena tanka  $50 \text{ m}^3$  neće prikupiti  $50 \text{ m}^3$  čistog ulja, nego znači da može prikupiti  $50 \text{ m}^3$  zajedno s prikupljenom morskom vodom. Zadani parametar se lako može uzeti u obzir tako da ograničenja ne budu jednaka volumenu zbroja tankova i volumena ulja koja treba sanirati, nego da volumen poslanih brodova bude veći od razlivenog ulja na morskoj površini. Nadalje, ne smije se zanemariti ni druga oprema koja potpomaže u sanaciji onečišćenja kao što su plivajuće ili brane ograde. Ulje, to jest mrlja na moru, ne stoji na jednome mjestu, nego se zbog meteoroloških i hidrografskih parametra kreće po morskoj površini. To znači da kod parametara udaljenosti treba uzeti navedeni fenomen u obzir. Upravo u takvim situacijama brane nam omogućuju lokalizaciju izlivenog ulja na određenom mjestu pa je udaljenost broda do mjesta onečišćenja lakše izračunati. Model se može koristiti i u situacijama kada skimmer uređaj nije ugrađen na plovilo, odnosno na specijalizirani brod za reagiranja na iznenadna onečišćenja mora. U takvim scenarijima ne treba



uzimati udaljenost do mjesta onečišćenja, niti brzinu broda, već se uzimaju parametri: brzina prikupljanja ulja pojedinog skimmer uređaja, brzina pumpe te tank koji se nalazi na obali, to jest na kopnu, a rijetko kada pluta na moru. U navedenom scenariju, potrebno je kod modela samo promijeniti parametre kod ulaznih podataka, a vrijednost parametara koji nisu potrebni postaje 0.

Treba voditi računa kako postoje dvije glavne vrste skimmer uređaja, skimmer četka i skimmer disk. Zbog boljeg prikupljanja ulja s morske površine, disk skimmer se koristi za prikupljanje lakših ulja koja su puno češća u zaljevima i uvalama. No, ne treba zanemariti kako i u zatvorenim ili poluzatvorenim akvatorijima dolazi do onečišćenja s bunker gorivom, to jest teškom sirovom naftom, gdje se češće upotrebljava skimmer - četka. Treba istaknuti kako je svako onečišćenje zasebno i neovisno o prijašnjim onečišćenjima s moguće nekoliko jednakih parametara, prije svega karakteristika specijaliziranih brodova i njihove lokacije. Svako novo onečišćenje nosi vlastite izazove, stoga se preporučuje korištenje modela ponovno s ulaznim ažuriranim podacima svaki put u slučajevima iznenadnoga onečišćenja. Model koji je predložen i prezentiran u disertaciji moguće je koristiti za bilo koji zaljev ili uvalu.

Važno je naglasiti kako postoji kontradikcija kod optimizacije trajanja uklanjanja ulja s površine mora s dodatkom optimizacije troškova. Na primjer, ako postoje dva broda i jedan brod skuplja naftu 3 h, a drugi brod 5 h, ukupno vrijeme skupljanja je 5 h. No, kada se uračuna cijena broda po satu, potrebno je platiti osam radnih sati. U drugom primjeru dva broda skupljaju ulje 4,5 h, a ukupno vrijeme je 4,5 h, što dovodi do zaključka da je ovo optimalno rješenje s obzirom na trajanje akcije čišćenja. Međutim, cijena ova dva broda je skuplja od prva dva broda. Iz tog razloga predlažu se dva modela i dvije vrste strategija optimizacije. Zapovjednik koji je odgovoran za sanaciju, uz suglasnost nadležnih vlasti odlučuje želi li najkraće vrijeme sakupljanja ulja, ako je slučaj da onečišćenje prijete osjetljivom području prirode ili vrši odabir s pomoću parametra cijene ako ulje ne ugrožava niti jedan prirodni resurs pa prema tome dužina trajanja sanacije može biti nešto duža ali zato jeftinija. Za kraj, model računa i ukupno vrijeme trajanja sanacije, odnosno prikupljanja ulja što je ključno kod novih izrada plana intervencija te samog planiranja čišćenja u trenutku nesreće. Iz analitičkog-eksperimentalnog dijela s pomoću *ADIOS*<sup>®</sup> programa slijedi da je poznavanje karakteristika ulja od velikoga značaja. Nepostojana ulja poput benzina i dizela isparavaju kroz nekoliko sati. Takva onečišćenja su najčešća na području Riječkog zaljeva za vrijeme ljetnih mjeseci i turističke sezone. Pošto se hlapljive čestice izgube u atmosferi najčešće intervencija na takve

vrste ulja nije potrebna. Dovoljno je samo nadzirati kretanje ulja i po potrebi usmjeriti ulje na područje gdje će se lakše prikupiti.

Postojana ulja poput teške nafte sporo isparavaju. Također je često potrebna i kemijska metoda kako bi se pospješila disperzija postojećih ulja. Iz tog razloga je ključno poznavati svojstva ulja, kako bi se lakše moglo previdjeti kretanje ulja te pravovremenim i pravilnim postupanjem spriječiti veće onečišćenje mora. Tako se direktno smanjuje rizik za gospodarstvo jedne države. Nadalje, rezultati zorno prikazuju i vrijeme koje je potrebno za određenu reakciju ulja, koja nam pomaže pri odabiru metoda za uklanjanje ulja s morske površine. Iz grafičkog prikaza rezultata moguće je odrediti veličinu posljedice koje pojedino ulje može izazvati, kao što je *Arabian Extra Light Aramco* na području Riječkog zaljeva. Potrebno je istaknuti da ako dođe do onečišćenja mora s uljem uvijek se mogu javiti nepredvidive okolnosti koje je teško proaktivno analizirati ili statistički izračunati iz prijašnjih onečišćenja. Stoga svako onečišćenje treba razmatrati zasebno, a navedena analiza nam može pomoći pri odabiru opreme i sredstava za sprječavanje onečišćenja mora i obala.

Predloženi model u disertaciji u usporedbi s modelima u preglednoj literaturi (Đorđević i sur. 2022, Dhaka i sur. 2021, Łazuga i sur. 2018, Weiwei i sur. 2015, Zhang i sur. 2019, Vetere i sur. 2021) nadopunjuje ih na način da:

- rezultat prikazuje i računa troškove,
- model računa količinu ulja koje je prikupljeno na pojedinom brodu,
- se optimizacija može izvršiti na način tako da se odaberu brodovi koji najbrže prikupljaju ulje ili oni koji su operativno najjeftiniji ili oni koji najbrže stignu na mjesto akcidenta.

## 6. ZAKLJUČAK

Priobalni dio mora je bogat plažama, hotelskim infrastrukturama, u blizini su akvakulture te često zaštićeni parkovi prirode. Što brža reakcija na uklanjanje ulja s mora u navedenim akvatorijima je od velike važnosti za očuvanje prirode i okoliša te sukladno tome na očuvanje turizma i gospodarskog razvitka zahvaćene države s onečišćenjem. Predloženim modelom može se izračunati optimalan broj brodova i koje brodove treba poslati kako bi sanacija onečišćenja bila što brža, a pri tome troškovi sanacije bili što manji. Jedinstvenost modela je što ima hijerarhijski pristup optimiziranja kod slanja i odabira specijaliziranih brodova. U odnosu na dosadašnja znanstvena postignuća, predloženi model optimizira intervenciju specijaliziranih brodova pomoću kontinuiranih varijabli: različite udaljenosti brodova do mjesta onečišćenja, različite brzine sakupljanja ulja pojedinog broda, povratak broda do mjesta iskrcaja prikupljenog ulja uz proračun vremena povratka broda do mjesta onečišćenja i računa ukupno vrijeme sanacije. Navedeno značajno pomaže kod izrade plana intervencija te tako direktno doprinosi očuvanju zaštite prirode i okoliša. Dosadašnji problem odabira specijaliziranog broda kojeg je potrebno aktivirati u operaciji čišćenja često je rezultirao slanjem svih raspoloživih brodova, što je rezultiralo neosnovano visokim troškom. U ovoj disertaciji je navedeni problem riješen. Nadalje, prikazala se važnost poznavanja karakteristika i starenja izlivenog ulja. Starenje ulja je bitan faktor prilikom primjene odgovarajućih metoda intervencije operativnog osoblja kod sanacije ulja s morske površine. Treba naglasiti kako svaku pomorsku nezgodu i svako uljno onečišćenje treba razmatrati posebno. No, ne treba zanemariti činjenicu da svako izlivanje ulja u more može imati slične posljedice na floru i faunu. Iz analitičkog i grafičkog prikaza s pomoću ADIOS® programa i optimizacije izvršene programom Matlab\_R2020a, vidljivo je da što brža reakcija i intervencija na iznenadna onečišćenja ulja olakšava prikupljanje ulja s morske površine i time smanjuje ugrozu na prirodu i okoliš. Bez obzira na mjere opreza i preventivne mjere, onečišćenja su uvijek moguća te su stalna prijetnja morskim i priobalnim ekosustavima. Što je moguće brža reakcija na iznenadno onečišćenje, osposobljeno operativno osoblje s odgovarajućom specijaliziranom opremom za uklanjanje onečišćenja, od vitalnog je značaja za očuvanje prirode i okoliša. Iz navedenih rezultata slijedi da su navedene hipoteze potvrđene.

## 7. LITERATURA

Babić M 2007. Makroekonomija. Vol 15. *Mate d.o.o.* Zagreb

Berthou F, Balouët G, Bodennec G, Marchand M. 1987. The occurrence of hydrocarbons and histopathological abnormalities in oysters for seven years following the wreck of the Amoco Cadiz in Brittany (France). *Marine Environmental Research*. 23:103-133.

Boyle CL. 1969. Oil Pollution of the Sea. *Oryx*. 10:01-43.

Bralić T, Slišković M. 2006. Najveće tankerske nezgode. NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. 53:3-4

Brdarić D, Kovač-Andrić E, Šapina M, Kramarić K, Lutz N, Perković T, Egorov A. 2019. Indoor air pollution with benzene, formaldehyde, and nitrogen dioxide in school in Osijek, Croatia. *Air Quality, Atmosphere & Health* 12:963-968

Buorne WRP, Parrack JD, Potts GR. 1967. Birds killed in the Torrey Canyon Disaster. *Nature*. 215:9.

Carls MG, Babcock MM, Harris PM, Irvine GV, Cusick JA, Rice SD. 2001. Persistence of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill. *Marine Environmental Research*. 51:167-190.

Castège I, Milon E, Pautrizel F. 2013. Response of benthic macrofauna to an oil pollution: Lessons from the „Prestige“ oil spill on the rocky shore of Guéthary (south of Bay of Biscay, France), *Deep-Sea Research II*. 106:192-197.

Chandrapati S, Williams MG 2014. Total Viable Counts: Most Probable Number (MPN), *Encyclopedia of Food Microbiology*. Vol 3. *Elsevier*. 621-624 pp.

Conan G, Dunnet GM, Crisp DJ. 1982. The Long-Term Effects of the Amoco Cadiz Oil Spill [and Discussion ]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*. 297:323-333.

Dauvin JC, Gentil F. 1990. Conditions of the peracarid populations of subtidal communities in Northern Brittany ten years after the Amoco Cadiz oil spill. *Marine Pollution Bulletin*. 21:3-123-130.

De le Huz R, Lastra M, Junoy J, Castellanos C, Viéitez JM. 2005. Biological impacts of oil pollution and cleaning in the intertidal zone of exposed sandy beaches: Preliminary study of the “Prestige” oil spill. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 65(1-2):19-29.

Dhaka A, Chattopadhyay P. 2021. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills. *Journal of Environmental Management*. Volume, 288, 112428.

Dhavalikar AS, Choudhari PC. 2022. Detection and Quantification of Daily Marine Oil Pollution Using Remote Sensing. *Water, Air, and Soil Pollution*. 233:8

Dorčić I 1987. Osnove čišćenja uljnih zagađenja. Vol 1. *SKTH/Kemija u industriji*. Zagreb, RH

Dutour Sikirić M, Babić-Ivančić V, Filipović-Vince N. 2010. Međudjelovanja na međupovršini anorgansko/organsko - od biomineralizacije do implant materijala za čvrsta tkiva. *Medicinski Vjesnik*. 42(3-4):73-86.

Dorđević M, Mohović Đ, Krišković A, Legović. 2022. Hierarchical Optimization of Oil Spill Response Vessels in Case of Accidental Pollution of Bays and Coves. *J. Mar. Sci. Eng*. 10:6-772

Dorđević M, Šabalja Đ, Mohović Đ, Brčić D. 2022. Optimisation Methodology for Skimmer Device Selection for Removal of the Marine Oil Pollution. *J. Mar. Sci. Eng*. 10:7-925.

Ehrhardt M 2015. Mathematical Modelling and Numerical Simulation of Oil Pollution Problems. Vol 2. The Reacting Atmosphere. *Springer*. Švicarska

EL-Magharaby MAE. 2008. Comparison of Standard Methods, MTF, and MF, by the Colilert Rapid Test for the Enumeration of Coliform Bacteria in High Salinity Water. *Arabian Gulf*. 38:1-77-90.

Esler D, Bowman TD, Trust KA, Ballachey BE, Dean TA, Jewett SC, O'Clair CE. 2002. Harlequin duck population recovery following the „Exxon Valdez“ oil spill: progress, process and constraints. *Mar Ecol Prog Ser*. 241:271-286.

Fay JA 1969. The spread of oil slicks on a calm sea. In: Hoult D, ed. Oil on the Sea. *Plenum Press*. New York, SAD, 53–64

Feng D, Liu L, Wang P, Zhang H, Xie X. 2011. The Experimental Study of Natural Sedimentation in Heavy Oil. *Advanced Materials Research*. 413:60-64.

Fenton, N, Neil M 2019. Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks, Vol 2. CRC Press, Taylor & Francis Group, A Chapman & Hall Book. UK

Fratila A, Gavril I, Nita S, Hrebenčić A. 2021. The Importance of Maritime Transport for Economic Growth in the Eurošaan Union: A Panel Data Analysis. *Sustainability*.13:17961.

Fukuyama AK, Shigenaka G, Coats DA. 2014. Status of intertidal infaunal communities following the Exxon Valdez oil spill in Prince William Sound, Alaska. *Marine Pollution Bulletin*. 84:1-2.

Geček S. 2023. Strujanje mora, U Cukrov N. ur. Studija utjecaja na okoliš uzgajališta kalifornijske pastrve na četiri lokacije V1 (Uvale Trsina i Tvrduša), V2 (Uvale Bilančevica i Bočarije Vele), V3 (Uvale Velika i Mala Črnika) i V4 (Uvale Marasovka i Pećci) u Velebitskom kanalu. R. Bošković, Zagreb. 141-178.

Geček S, Legović T. 2012. Impact of maximum sustainable yield on competitive community. *Journal of Theoretical Biology*. 307:96-103

George JD. 1971. The Effects of Pollution by Oil and Oil-Dispersants on the Common Intertidal Polychaetes, Cirriformia tentaculata and Cirratulus cirratus. *The Journal of Applied Ecology*. 8:2-411.

Grech M, Horberry T, Smith A. 2002. Human Error in Maritime Operations: Analyses of Accident Reports Using the Leximancer Tool, *Key Centre of Human Factors and Applied Cognitive Psychology, University of Queensland, Brisbane, Qld*, 46:19

Guo L, Li B. 2019. Effect of Different Startup Models on the Cavitation Performance in Rotary Lobe Pump. *Earth and Environment mental Science*. 240:062046

Harilaos N. 2006. Maritime safety in the post-prestige era. *Mar Technol SNAME News*. 43:2-85-90

He T, Li Z, Deng H, Chen Q. 2022. Flow Characteristics Analysis of a Balanced Valve Distribution Double-Row Axial Piston Pump. *Mech. Sci*. 13:1-207-223.

Irons DB, Kendall SJ, Erickson WP, McDonald LL, Lance BK. 2010. NINE YEARS AFTER THE EXXON VALDEZ OIL SPILL: EFFECTS ON MARINE BIRD POPULATIONS IN PRINCE WILLIAM SOUND, ALASKA. *The Condor*. 102:723-737.

Jones PH, Monnat JY, Cadbury CJ, Stowe TJ. 1978. Birds Oiled during the AMOCO CADIZ Incident – an Interim Report. *Marine Pollution Bulletin*. 9:11-307-310.

Jusup M, Geček S, Legović T. 2007. Impact of aquacultures on the marine ecosystem: modelling benthic carbon loading over variable depth. *Ecological Modelling*. 200(3-4): 459-466.

Jusup M, Holme P, Kanazawa K, Takayasu M, Romić I, Wang Z, Geček S, Lipić T, Podobnik B, Wang L, Luo W, Klanjšček T, Fan J, Boccaletti S, Perc M. 2022. Social Physics. *Physics Reports*. 948: 1-148.

Kersan-Škabić I 2015. Ekonomija Europske Unije, Vol 2. *Fakultet ekonomije i turizma, Dr. Mijo Mirković Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli*. Pula, RH

Klanjšček J, Geček S, Marn N, Legović T, Klanjšček T. 2018. Predicting perceived level of disturbance of visitors due to crowding in protected areas. *PLOS ONE*. 13(6).

Kovač-Andrić E, Herjavić G, Muharemović H. 2013. Hlapljivi ugljikovodici u graničnom sloju u Tikvešu, Park prirode Kopački rit. *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa*. 62(7-8):235-239.

Kristiansen S 2005. Maritime Transportation Safety Management and Risk Analysis. Vol 1. *Routledge*. London, UK

Law RJ. 2011. The Torrey Canyon Oil Spill, 1967. *Oil Spill Science and Technology*. 1103–1106.

Lazuga K, Gucma L, Perkovic M. 2018. The Model of Optimal Allocation of Maritime Oil Spill Combat Ships. *Sustainability*. 10:2321.

Legović T, Klanjšček J, Geček S. 2010. Maximum sustainable yield and species extinction in ecosystems. *Ecological Modeling*. 221(12):1569-1574

Lindeberg MR, Maselko J, Heintz RA, Fugate CJ, Holland L. 2017. Conditions of persistent oil on beaches in Prince William Sound 26 years after the Exxon Valdez spill. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 147:9-19.

Liubartseva S, Coppini G, Verdiani G, Mungari T, Ronco F, Pinto M, Pastore G, Lecci R. 2023. Modeling Chronic Oil Pollution From Ships. *Marine Pollution Bulletin*. 195:115450

Matkin CO, Saulitis EL, Ellis GM, Olesiuk P, Rice SD. 2008. Ongoing population-level impacts on killer whales *Orcinus orca* following the 'Exxon Valdez' oil spill in Prince William Sound, Alaska. *Mar Ecol Prog Ser*. 356:269-281.

O'Hara CM. 2005. Manual and automated instrumentation for identification of Enterobacteriaceae and other aerobic gram-negative bacilli. *Clin Microbiol Rev*. 18(1):147-62

Orlić M, Gačić M, LaViolette PE. 1992. The currents and circulation of the Adriatic Sea. *Oceanologica Acta*. 15:109-124.

Ozretić V 1996. Ship Auxiliary Machines and Devices. Vol 1. *Split Ship Management*. Split, RH

Peterson CH, Rice SD, Short JW, Esler D, Bodkin JL, Ballachey BE, Irons DB. 2003. Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill. *Science*. 302:2082.

Poulain PM. 2013. Tidal currents in the Adriatic as measured by surface drifters. *J. Geophysical Res. Oceans*. 118:1434-1444

Schlager N 2000. Science and its Times, Vol 7. *Gale Group*. SAD

Southward AJ, Southward EC. 1987. Recolonization of Rocky Shores in Cornwall After Use of Toxic Dispersants to Clean Up the Torrey Canyon Spill. *Journal of the Fisheries Board of Canada*. 35:5.

Vetere A, Profrock D, Schrade W. 2021. Qualitative and Quantitative Evaluation of Sulfur-Containing Compound Types in Heavy Crude Oil and its Fractions. *Energy Fuels*, 35:8723-8732

Vinnem J 1999. Offshore Risk Assessment; Principles, Modeling and Applications of QRA Studies. Vol 1. *Faculty of Marine Technology*. Norveška

Walker D, McQuillan, J., Taiwo, M., Parks, R., Stenton, C., Morgan, H., Mowlem, M., Lees, D. 2017. A highly specific *Escherichia coli* qPCR and its comparison with existing methods for environmental waters, *Water Research*, 126:101-110



Weiwei J, Wei A, Yupeng Z, et al. Research on Scheduling Optimization of Marine Oil Spill Emergency Vessels. *Aquatic Procedia*, 3 (2015), 35-40.

Ye X, Chen B, Lee K, Storesund R, Li P, Kang Q, Zhang B. 2021. An Emergency Response System by Dynamic Simulation and Enhanced Particle Swarm Optimization and Application for a Marine Oil Spill Accident. *Journal of Cleaner Production*, 297:126591

Zhang Q, Wen Y, Han D, Zhang F, Xiao C. 2019. Construction of knowledge graph of maritime dangerous goods based on IMDG code. *Journals The Institution of Engineering and Technology*. 3:361-365

### **Mrežne stranice:**

Desmi, dostupno na: <https://www.desmi.com/products-solutions-library/desmi-boom/> (22. 3. 2024.)

EMSA to assist clean up operations off Piraeus, dostupno na: <https://safety4sea.com/emsa-to-assist-clean-up-operations-off-piraeus/> (10. 11. 2020.)

Hrvatska Enciklopedija, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/gustoca> (19. 3. 2024.)

Iopcfunds-Claims. dostupno na: [http://www.iopcfunds.org/uploads/tx\\_iopcpublishations/IOPC\\_Claims\\_Form\\_ENGLISH\\_2018\\_WEB\\_01.pdf](http://www.iopcfunds.org/uploads/tx_iopcpublishations/IOPC_Claims_Form_ENGLISH_2018_WEB_01.pdf) (9. 4. 2024.)

Environmental Studies, dostupno na: [https://www.tutorialspoint.com/environmental\\_studies/environmental\\_studies\\_classification\\_of\\_ecosystem.htm](https://www.tutorialspoint.com/environmental_studies/environmental_studies_classification_of_ecosystem.htm) (9. 4. 2024.)

IOPCFUNDS, dostupno na: <https://iopcfunds.org/> (25. 6. 2024.)

MathWorks, dostupno na: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html> (26. 2. 2024.)

Number of oil tanker spills in 2019 the lowest in 50 years, dostupno na: <https://safety4sea.com/itopf-number-of-oil-tanker-spills-in-2019-the-lowest-in-50-years/> (9. 12. 2020.)

Potonuće broda Amoco Cadiz, dostupno na:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Amoco\\_Cadiz\\_oil\\_spill#/media/File:Amoco\\_Cadiz\\_2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Amoco_Cadiz_oil_spill#/media/File:Amoco_Cadiz_2.jpg) (21. 12. 2020.)

Potonuće broda Pestic, dostupno na: <https://safety4sea.com/cm-learn-from-the-past-prestige-sinking-one-of-the-worst-oil-spills-in-europe/> (21. 12. 2020.)

Statista, dostupno na: <https://www.statista.com/statistics/268553/number-of-oil-spills-by-oil-tankers-since-1970/> (15. 2. 2024.)

Use of booms in oil Pollution Response, dostupno na:

[https://www.itopf.org/fileadmin/data/Documents/TIPS%20TAPS/TIP\\_3\\_Use\\_of\\_Booms\\_in\\_Oil\\_Pollution\\_Response.pdf](https://www.itopf.org/fileadmin/data/Documents/TIPS%20TAPS/TIP_3_Use_of_Booms_in_Oil_Pollution_Response.pdf) (18. 12. 2020.)

WebGNOME, dostupno na: <https://gnome.orr.noaa.gov> (18. 3. 2024.)

### **Priručnici:**

IMO, Manual on oil pollution, section IV-combating oil spills, London, 2005.

Model Course: Oil pollution, preparedness, response and co-operation, level 2, second edition, IMO, London, 2005.

## ŽIVOTOPIS

Rođen sam 26. 1. 1993. godine u Rijeci. Nakon završene Pomorske škole Bakar, upisujem studij Nautike i tehnologije pomorskog prometa na Pomorskom fakultetu Rijeka, Sveučilište u Rijeci, gdje 2017. godine dobivam akademski naziv: magistar inženjer Nautike i tehnologije pomorskog prometa. Godine 2018. zapošljava se na mjesto suradnika za zaštitu morskog okoliša u Ustanovi ATRAC u Rijeci. Godine 2019. upisujem poslijediplomski studij, a 2020. zaposlen sam na mjesto Stručnog suradnika za reagiranje na iznenadna onečišćenja mora i zaštitu morskog okoliša u Ustanovi ATRAC. Sudjelovao sam u znanstvenim i stručnim projektima: CASCADE, Interreg V-A Italy-Croatia, FIRESPELL, Interreg V-A Italy-Croatia, PEPSEA, Interreg V-A Italy-Croatia. Od 2021. godine nastavnik sam matematike u osnovnim i srednjim školama iz predmeta Matematike te sam gost - predavač na Veleučilištima i Sveučilištima iz kolegija: Ekologija, Tehnologija uklanjanja onečišćenja s mora te kolegij vezan za Suvremeni način transporta robe i tereta. Od 2024. godine zaposlen sam na Veleučilištu PAR u Rijeci.

### Popis znanstvenih članaka:

Đorđević M, Koboević Ž. 2021. Oil Pollution of the Mediterranean as a Result of Maritime Accidents. *Naše more*, 2nd International Conference of Maritime Science & Technology. 52-63.

Đorđević M, Mohović Đ, Krišković A, Legović, T. 2022. Hierarchical Optimization of Oil Spill Response Vessels in Cases of Accidental Pollution of Bays and Coves. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10(6):772-802.

Đorđević M, Šabalja Đ, Mohović Đ, Brčić D. 2022. Optimisation Methodology for Skimmer Device Selection for Removal of the Marine Oil Pollution. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10(7):925-945.

Malnar T, Šabalja Đ, Đorđević M, Komadina P. 2022. Risk Assessment of the Extraordinary Pollution in the Adriatic Sea as an Economically Important Area for the Republic of Croatia. *Pomorstvo*. 36(2):204-213.

Margeta A, Šabalja Đ, Đorđević M. 2021. The Presence and Danger of Microplastics in the Oceans. *Pomorstvo*. 35(2):224-230.

Aktivna sudjelovanja na koordinacijama i kongresima:

1. Organizacija II Koordinacije za „Unaprjeđenje sustava pripravnosti i reagiranja na iznenadna onečišćenja morskog okoliša“, Biograd na moru 3-4. travnja 2019.
2. Organizacija IV Jadranske Konferencije, pod nazivom „ADRIASPILLCON 2019“ za prevenciju, spremnost te reagiranje na onečišćenje mora; Opatija, 28.-30. svibnja 2019.
3. Oralna prezentacija: „Oil Pollution of the Mediterranean as a Result of Maritime Accidents“, 7th Annual International Conference on Transportation, Atena, Grčka, 13. 6. 2021.
4. Sudjelovanje u održavanju radionice: „Širenje svijesti o potrebi zaštite Jadranskog mora“, Rijeka, 22.11.2021. Predavanje: Proces starenja ulja na površini mora i oceana te posljedice na floru i faunu.
5. Oralna prezentacija: „Contribution to the Improvement of the System of Action in the Event of Sudden Marine Pollution“, 8th Annual International Conference on Transportation, Atena, Grčka, 30. 5. - 2. 6. 2022.
  - Član međunarodne organizacije: International Spill Control Organization (ISCO), UK.
  - Član međunarodne organizacije: The Nautical Institute, UK.